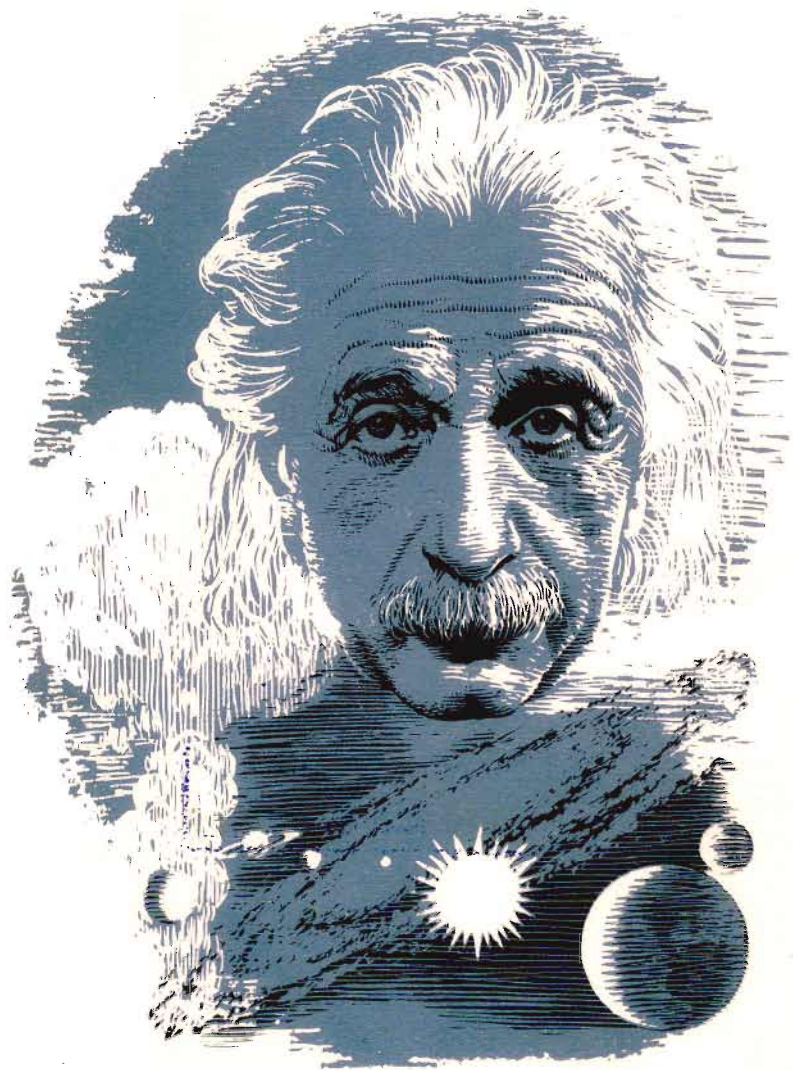
Martin Gardner

La relatività per tutti

Sansoni Editore

3

BIBLIOTECA
DI «GALILEO»

La relatività per tutti

di Martin Gardner

Illustrato da Anthony Ravielli

Sansoni editore

Indice

Introduzione VII

1. *Assoluto o relativo?* 3
2. *L'esperimento Michelson-Morley* 13
3. *La teoria della relatività ristretta (parte prima)* 33
4. *La teoria della relatività ristretta (parte seconda)* 53
5. *La teoria della relatività generale* 71
6. *La gravità e lo spazio-tempo* 87
7. *Il principio di Mach* 109
8. *Il paradosso dei gemelli* 117
9. *Modelli dell'universo* 129
10. *Grande esplosione o stato stazionario?* 157

Glossario 171

Cronòlogia 179

Bibliografia 181

Indice analitico 185

Introduzione

Tanti ormai sono i libri di divulgazione sulla relatività che il lettore può chiedersi: « Perché scriverne un altro? » Ci sono tre ragioni:

1. Le migliori opere di introduzione alla relatività elementare sono state scritte molto tempo fa e oggi sono superate. È vero che nella teoria della relatività non si sono verificati cambiamenti fondamentali, ma si sono avute nuove conferme sperimentali, si sono trovati nuovi modi di affrontare certi problemi, nuovi modelli cosmologici. Un'introduzione moderna dovrebbe tener conto di questi sviluppi.

2. Cercar di spiegare una volta di più un argomento importante e complicato nel modo più semplice e divertente possibile, senza deformarlo gravemente, è una sfida a cui è difficile resistere.

3. Nessun altro libro divulgativo sulla relatività è mai stato illustrato con tanta cura. L'arte grafica di Anthony Ravielli è così brillante da distinguere questo libro da tutti gli altri.

Ho resistito alla tentazione di concludere con un capitolo sulle conseguenze filosofiche della relatività, perché sono convinto che, nel campo della filosofia comunemente intesa, la relatività non comporta conseguenze. Essa ha fornito ovviamente delle deduzioni alla teoria della conoscenza e alla filosofia della scienza, soprattutto mediante la dimostrazione che la struttura matematica dello spazio-tempo non può essere determinata senza l'osservazione e l'esperimento, ma per quel che concerne gli argomenti tradizionali della filosofia — Dio, l'immortalità, il libero arbitrio, il bene e il male, ecc. — la relatività non ha as-

solutamente nulla da dire. È assurdo credere che la fisica della relatività giustifichi dei giudizi relativistici soggettivi, ad esempio, in antropologia, o un relativismo nei riguardi della morale. La relatività, anzi, introduce tutta una serie di nuovi « assoluti ».

Si è affermato talvolta che la teoria della relatività rende più difficile pensare all'esistenza di un « grande mondo » fuori dalle nostre deboli menti, dotato di una struttura ordinata esplicabile in parte mediante leggi scientifiche. « Man mano che questa materia (la relatività) si veniva sviluppando », scrive l'astronomo inglese James Jeans nel suo libro, The Growth of Physical Science *(L'evoluzione della scienza fisica), « divenne chiaro che i fenomeni della natura erano determinati piuttosto da noi e dalla nostra esperienza che da un universo meccanico al di fuori di noi e da noi indipendente ».*

Questo « soggettivismo » o « idealismo » o comunque lo si voglia chiamare per distinguerlo dal « realismo » degli scienziati operanti, è stato collegato, in tempi recenti, alla relatività da alcuni eminenti fisici che avrebbero dovuto essere più accorti. Si tratta di un atteggiamento metafisico abbastanza rispettabile; ma non è minimamente sostenuto dalla relatività. E non fu certamente questo il punto di vista di Einstein, come vedrete subito leggendo la citazione con cui questo libro si apre. Non discuterò qui questo argomento; se al lettore interessa, lo potrà trovare vigorosamente trattato da due filosofi della scienza contemporanea di grande autorità, Adolf Grünbaum, in un articolo ristampato nell'antologia Philosophy of Science *(La filosofia della scienza), e Philipp Frank, nel capitolo VII del suo libro* Philosophy of Science.

Ringrazio vivamente John Stachel, professore di Fisica all'Università di Pittsburgh, per aver letto il manoscritto di questo libro, e per le sue correzioni e i suoi preziosi suggerimenti. Naturalmente non va attribuita a lui la responsabilità della posizione da me assunta nelle questioni controverse.

MARTIN GARDNER

Fuori, lassù, c'era questo immenso mondo, che esiste indipendentemente da noi esseri umani e che ci sta di fronte come un grande eterno enigma, accessibile solo in parte alla nostra osservazione e al nostro pensiero. La contemplazione di questo mondo mi attirò come una liberazione...

ALBERT EINSTEIN, *Note Autobiografiche*

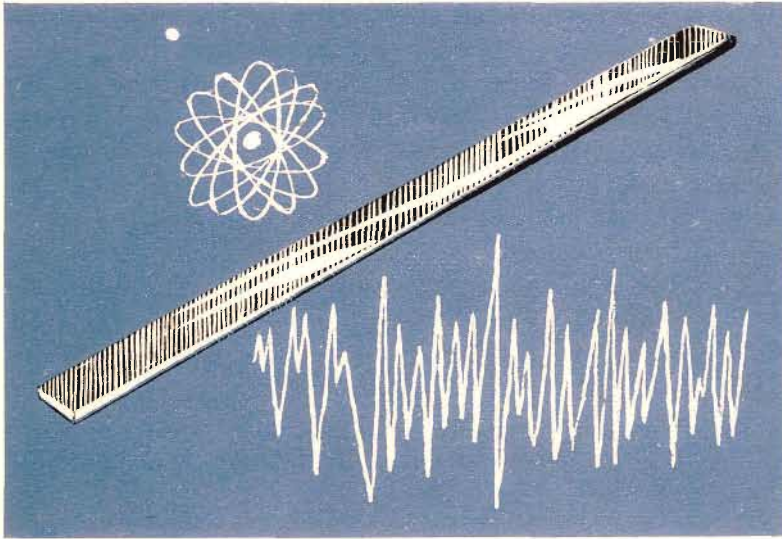
1

Assoluto o relativo?

Due marinai, Beppe e Toni, fecero naufragio su un'isola deserta. Passarono alcuni anni. Un giorno Beppe trovò una bottiglia, gettata a riva dal mare; era una di quelle nuove bottiglie di Coca-Cola formato gigante. Toni impallidì.

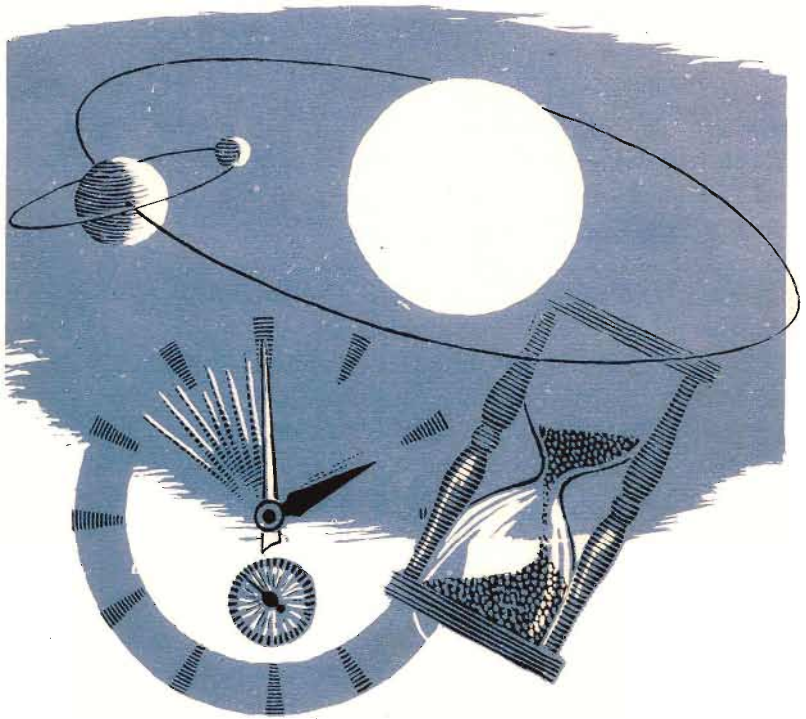
« Ehi, Beppe! » gridò. « Ci siamo accorciati! »

La storiella ha la sua morale. Ed è questa: non c'è altro modo di valutare la grandezza di un oggetto che confrontarla con la grandezza di qualche altra cosa. I Lillipuziani ritennero Gulliver un gigante; i Brobdingnagiani un nano. È grande o piccola una palla da biliardo? Ecco, è straordinariamente grande *relativamente* a un atomo, ma è straordinariamente piccola *relativamente* alla Terra.

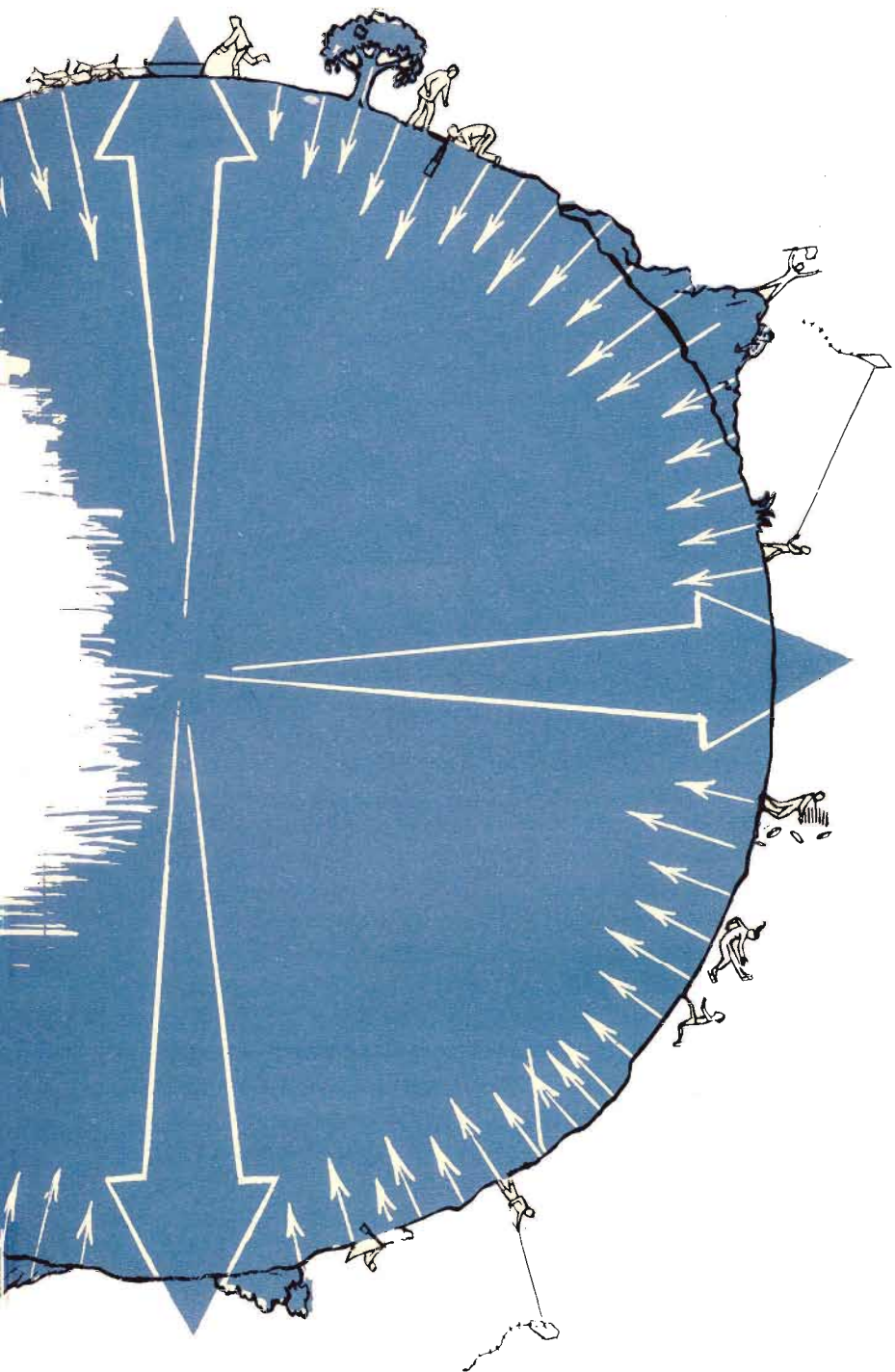
Jules Henri Poincaré, famoso matematico francese del secolo XIX che anticipò molti aspetti della teoria della relatività, espresse lo stesso insegnamento in altra forma (un esperimento di questo tipo, che si può immaginare solamente ma non effettivamente eseguire, viene chiamato dagli scienziati « esperienza ideale »). Immaginatevi, diceva Poincaré, che una notte, mentre siete immersi nel sonno, tutto nell'universo diventi mille volte più grande di prima. E con la parola tutto, Poincaré intendeva proprio *tutto*: elettroni, atomi, lunghezze d'onda della luce, voi stessi, il vostro letto, la vostra casa, la Terra, il Sole, le stelle. Una volta svegli, sareste in grado di affermare che c'è stato un cambiamento? C'è qualche esperimento con cui potreste dimostrare che la vostra grandezza è mutata?

No, dichiarava Poincaré, non esiste un esperimento del genere. Infatti l'universo sarebbe in realtà lo stesso di prima. Non avrebbe nemmeno senso asserire che è diventato più grande. « Più grande » significa più grande in relazione a qualche altra cosa; e in questo caso non esiste « qualche altra cosa ». Sarebbe altrettanto senza senso dire che l'intero universo si è rimpicciolito.

La grandezza, dunque, è relativa. Non c'è un modo *assoluto* di misurare un oggetto e di dire che è in via assoluta grande così e così. Un oggetto si può misurare soltanto applicando altre grandezze, come la lunghezza di una verga da un metro. Ma quanto è lunga la verga da un metro? Prima del 1° gennaio 1962, si definiva il metro come la lunghezza di una certa sbarra di platino conservata a temperatura costante, in un sotterraneo, a Sèvres, in Francia. Dal 1° gennaio 1962 in poi il nuovo modello del metro è la lunghezza di 1.656.763,83 lunghezze d'onda di un certo tipo di radiazione arancione emessa nel vuoto dall'atomo di cripton 86. Naturalmente, se tutto nell'universo dovesse diventare più grande o più piccolo nelle medesime proporzioni, compresa la lun-

ghezza d'onda di questa radiazione, non ci sarebbe egualmente un metodo sperimentale per scoprire il cambiamento.

Lo stesso succede per le durate temporali. La Terra impiega un tempo « lungo » o « breve » per compiere un giro intorno al Sole? Ad un bambino il periodo che intercorre tra un Natale e il successivo sembra un'eternità. Per un geologo, abituato a pensare in termini di milioni di anni, un anno non è che un attimo fugace. Un intervallo di tempo, come un tratto di spazio, non lo si può misurare se non paragonandolo a qualche altro intervallo di tempo. Un anno è misurato dal periodo di rivoluzione della Terra intorno al Sole; un giorno dal tempo impiegato dalla Terra a ruotare attorno al proprio asse; un'ora dal tempo che impiega la lancetta grande di un orologio a fare un intero giro. Sempre un intervallo di tempo viene misurato confrontandolo con un altro.

Un famoso racconto di fantascienza di H. G. Wells, intitolato *Il nuovo acceleratore*, contiene la stessa lezione della storiella dei due marinai. Ma questa volta la lezione riguarda il tempo anziché lo spazio. Uno scienziato trova il modo di affrettare tutti i processi del proprio corpo. Il suo cuore batte più rapidamente, il suo cervello lavora più in fretta, eccetera. Potete immaginare quello che avviene; il mondo sembra rallentare fino a fermarsi. Lo scienziato passeggia, ma lemme lemme per evitare che l'attrito dell'aria gli dia fuoco ai calzoni. La strada è piena di statue umane. Un uomo è impietrito nell'atto di ammiccare a due ragazze che passano. Nel parco, una banda suona con un rantolo grave e sfiatato. Un'ape vola nell'aria... a passo di lumaca.

Proviamo a fare un'altra esperienza ideale. Supponiamo che ad un determinato istante tutto nel cosmo cominci a muoversi a velocità minore, oppure a velocità maggiore, o magari si fermi completamente per qualche milione di anni. Sarebbe percettibile il cambiamento? No, non vi è alcun esperimento atto a scoprirlo. Anzi, sostenere che ha avuto luogo un cambiamento del genere non avrebbe senso. Il tempo, come la distanza nello spazio, è relativo.

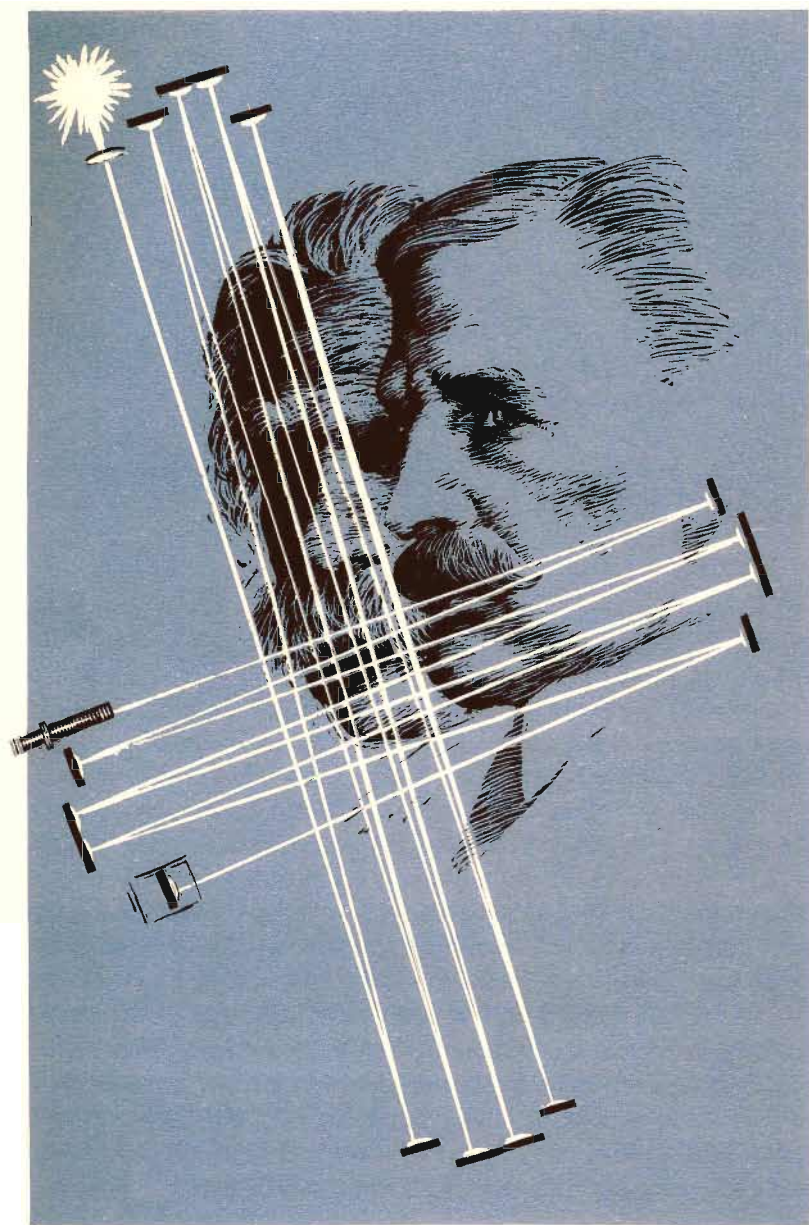
Molti altri concetti familiari della vita di tutti i giorni sono relativi. Prendiamo i termini « su » e « giù ». Un tempo riusciva difficile alla gente capire perché un uomo che si trovasse agli antipodi non pendesse a capo in giù, con il sangue che gli affluiva alla testa. E anche oggi i bambini incontrano la stessa difficoltà quando imparano per la prima volta che la Terra è sferica. Se la Terra fosse di vetro trasparente e fosse possibile guardarle attraverso con un telescopio, vedreste proprio la gente capovolta con i piedi attaccati al vetro. Cioè la gente apparirebbe capovolta *relativamente* a voi. E naturalmente *voi* apparireste capovolti relativamente a *loro*. Sulla Terra, « su » è la direzione che si allontana dal centro della Terra; « giù » la direzione verso il centro della Terra. Nello spazio interstellare non esiste un « su » o un « giù » assoluto, perché non abbiamo a disposizione nessun pianeta da utilizzare come « sistema di riferimento ».

Immaginate una nave spaziale in viaggio attraverso il sistema solare. Ha la forma di una gigantesca ciambella ed è dotata di un moto di rotazione, di modo che la forza centrifuga crei un campo di gravità artificiale. Dentro all'astronave, i cosmonauti possono camminare lungo la parete esterna della ciambella come se fosse un pavimento. Questa volta, « giù » è la direzione che si *allontana* dal centro, « su » è la direzione *verso* il centro: esattamente il contrario di quanto avviene su un pianeta rotante.

Così vedete che non ci sono dei « su » o « giù » assoluti nell'universo. Su e giù sono relativi al verso secondo cui agisce un campo gravitazionale. Sarebbe assurdo dire che, mentre dormivate, l'intero cosmo si è capovolto, perché non c'è nulla che costituisca un sistema di riferimento per decidere che posizione l'universo ha preso.

Un altro cambiamento relativo è il trasformarsi di un oggetto nella propria immagine speculare, cioè nel simmetrico di se stesso. Se una R maiuscola è stampata a rovescio così, Я , la riconoscete immediatamente come l'immagine speculare, simmetrica, di una R. Ma se l'intero universo (voi compresi) si trasformasse improvvisamente nel proprio simmetrico, non avreste modo di scoprire la metamorfosi. Naturalmente, una persona sola che si trasformasse nella propria immagine speculare mentre il resto del cosmo rimane immutato, avrebbe l'impressione che il cosmo fosse a rovescio. Dovrebbe tenere il libro davanti ad uno specchio per riuscire a leggere, proprio come Alice, al di là dello specchio, cercava di leggere la stampa rovesciata di *Jabberwocky* tenendo la poesia davanti ad uno specchio. Ma se *tutto* fosse a rovescio, non ci sarebbe alcun mezzo pratico per scoprire il cambiamento. Sarebbe altrettanto privo di significato dire che ha avuto luogo un simile rovesciamento che dire che l'universo si è capovolto o che è diventato grande il doppio.

E il movimento è assoluto? Esiste qualche esperimento che possa dimostrarci con sicurezza se un oggetto si muove o sta fermo? Il moto è un altro concetto relativo che si può determinare solo confrontando un oggetto con un altro? O c'è nel moto qualcosa di peculiare, qualcosa che lo rende diverso dai concetti relativi considerati fin qui?

Proprio in risposta a queste domande Einstein sviluppò la sua famosa teoria della relatività. E questa teoria è così contraria al senso comune, che ancor oggi ci sono migliaia di scienziati (fisici compresi) che, per afferrarne i concetti fondamentali, incontrano l'identica difficoltà che incontra un bambino a capire come mai gli abitanti della Cina non cadano dalla Terra.

Se siete giovani, avete un grande vantaggio su questi scienziati. Nelle vostre menti non si sono ancora scavati quei solchi profondi lungo i quali tanto spesso sono costretti a muoversi i pensieri. Ma, qualunque sia la vostra età, se avete voglia di esercitare la vostra mente, non c'è motivo per cui non possiate imparare a sentirvi a vostro agio nello strano mondo della relatività.

L'esperimento Michelson-Morley

Il moto è relativo? Dopo una prima riflessione potreste sentirvi portati a rispondere: « Certo che lo è! » Immagiamo un treno che si muova verso nord con una velocità di 60 chilometri all'ora. Sul treno un uomo cammina verso sud alla velocità di 3 chilometri all'ora. In quale direzione si muove quest'uomo e a quale velocità? Appare subito chiaro che non si può rispondere a questa domanda senza scegliere un sistema di riferimento. Rispetto al treno, l'uomo si muove verso sud alla velocità di 3 chilometri orari. Rispetto al suolo, si muove verso nord alla velocità di 60 meno 3, cioè 57 chilometri all'ora.

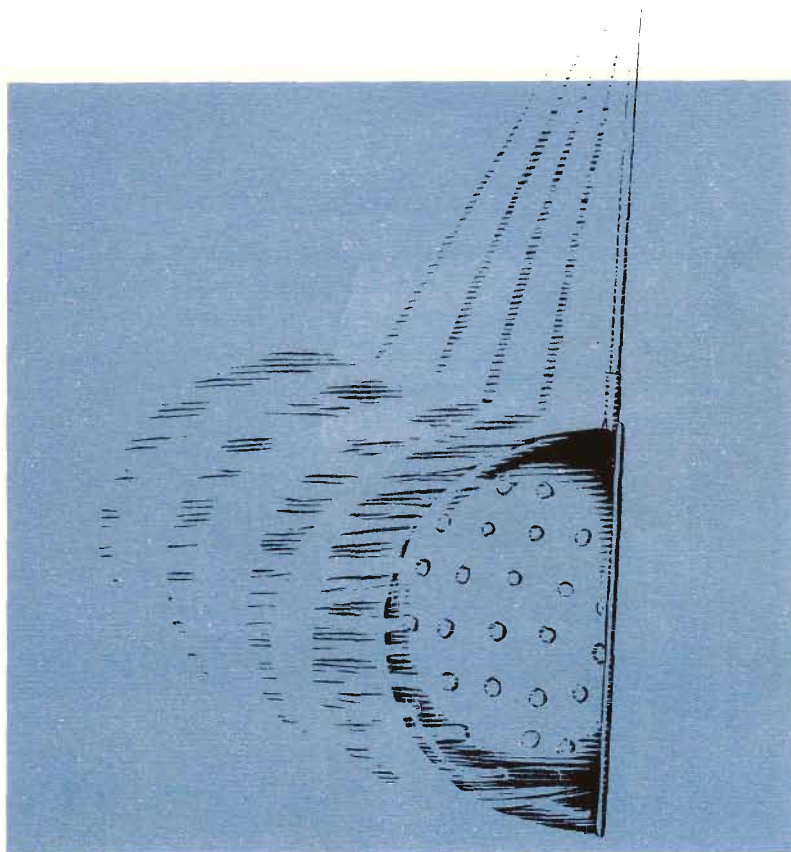
Possiamo dire che la « velocità relativa al suolo » di quest'uomo (cioè 57 chilometri orari) è la sua velocità vera, assoluta?

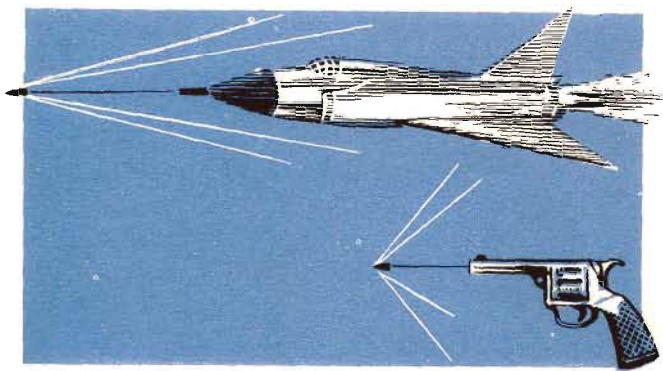
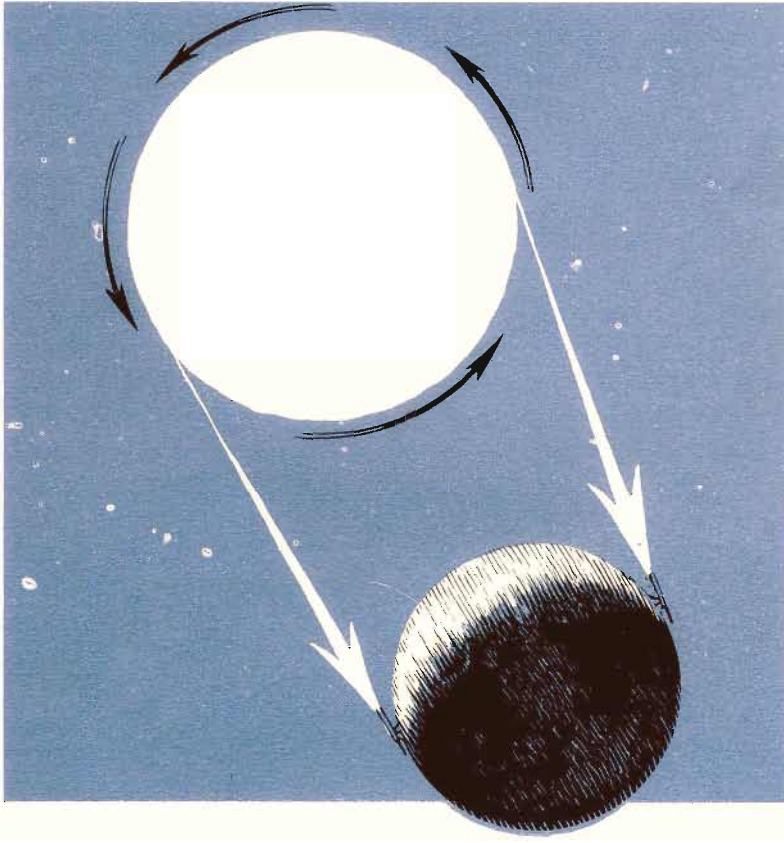
No, perché ci sono altri e più grandi sistemi di riferimento. La stessa Terra è in movimento: ruota su se stessa e per di più gira attorno al Sole. Il Sole, con tutti i suoi pianeti, viaggia attraverso la Galassia. La Galassia ruota e si muove rispetto alle altre galassie. Le galassie, a loro volta, formano ammassi galattici che si muovono gli uni rispetto agli altri. E nessuno sa fino a che punto possiamo portare avanti questa catena di movimenti. Non c'è alcun mezzo evidente di stabilire il moto assoluto di una cosa; cioè, non c'è un definitivo sistema fisso di riferimento rispetto al quale si possano misurare tutti i movimenti. Moto e quiete, come grande e piccolo, lento e veloce, su e giù, destra e sinistra, sembrano essere del tutto relativi. Non c'è altra maniera di misurare il moto di un corpo che confrontandolo col moto di qualche altro corpo. Ahimè, non è così semplice! Se fosse tutto qui, Einstein non avrebbe avuto bisogno di sviluppare la sua teoria della relatività. Ai fisici sarebbe stata nota da sempre!

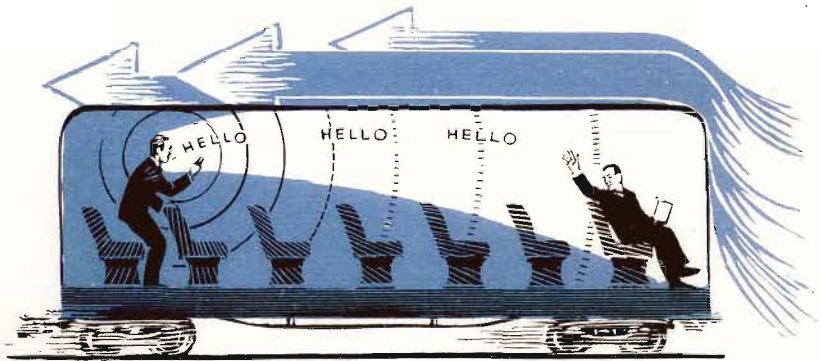
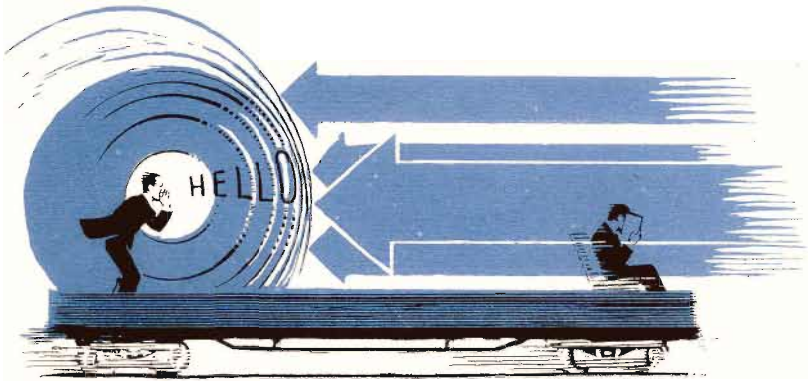
Ecco perché la cosa non è tanto semplice: ci sono, in apparenza, due metodi semplicissimi per scoprire il moto assoluto. L'uno si serve della velocità della luce; l'altro di vari effetti di inerzia che si verificano quando un corpo in movimento modifica la propria traiettoria o la propria velocità. La teoria della relatività ristretta di Einstein riguarda il primo di questi metodi, e la sua teoria della relatività generale ha a che fare col secondo. In questo capitolo e nei prossimi due considereremo il primo dei due metodi, quello che si serve della velocità della luce.

Nel secolo XIX, prima dell'epoca di Einstein, i fisici si raffiguravano lo spazio come contenente una specie di sostanza invisibile ed immutabile chiamata *etere.* Spesso era chiamata anche l'« etere luminifero », col significato di portatore delle onde luminose. Questa sostanza riempiva l'intero universo; permeava tutte le sostanze materiali. Se si aspirava l'aria da una campana di vetro, questa rimaneva piena: piena di etere. Altrimenti, come avrebbe potuto la luce propagarsi attraverso al vuoto? La luce è un moto ondulatorio; ci doveva pur essere qualche cosa per trasmettere la vibrazione. L'etere stesso, sebbene dovesse vibrare, ben di rado si muoveva con i corpi materiali; piut-

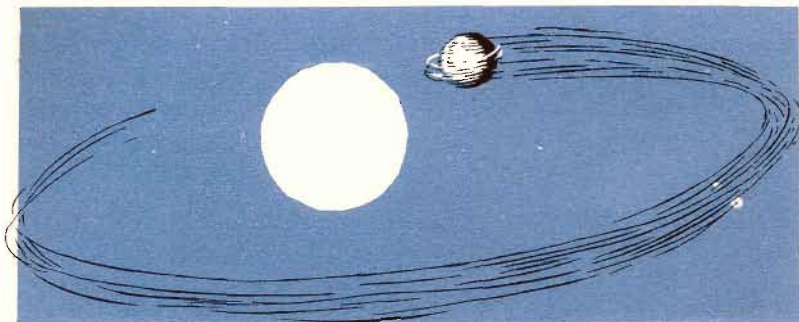
tosto tutti i corpi dovevano muoversi attraverso ad esso, come un colabrodo si muoverebbe attraverso all'acqua. Il moto assoluto di una stella, di un pianeta o di qualsiasi altro corpo, era, secondo questi primi fisici, semplicemente il suo moto rispetto al mare d'etere, immobile ed invisibile.

Ma se l'etere è una sostanza immateriale ed invisibile, come potremo misurare il movimento, ad esempio, della Terra rispetto ad esso? La risposta è semplice: si può confrontare il moto della Terra con il moto di un raggio di luce.

Per capire la faccenda, prendiamo un momento in considerazione la natura della luce. La luce, in realtà, è solamente la piccola porzione visibile di uno spettro di radiazione elettromagnetica che comprende le onde radio, le onde radar, la luce infrarossa, la luce ultravioletta, e i raggi gamma. Quanto diciamo sulla luce in questo libro si applica egualmente a qualsiasi tipo di onda elettromagnetica, ma « luce » è un termine più breve di « onda elettromagnetica », e così lo adotteremo d'ora in poi. La luce è un moto ondulatorio. Pensare a un moto del genere senza pensare anche ad un etere materiale sembrava ai primi fisici altrettanto assurdo che pensare alle onde dell'acqua senza pensare all'acqua.

Se un proiettile viene sparato in avanti dalla cima di un aviogetto in movimento, la velocità del proiettile rispetto al suolo è maggiore che se fosse sparato da una pistola impugnata da qualcuno a Terra. La velocità rispetto al suolo del proiettile sparato dall'aviogetto si ottiene sommando la velocità dell'aereo alla velocità del proiettile. Nel caso della luce, però, la velocità di un raggio non è influenzata dalla velocità del corpo che lo emette.

Questa proprietà venne dimostrata in modo inoppugnabile da esperimenti condotti alla fine del XIX secolo e agli inizi del XX, ed è stata ampiamente confermata in seguito. L'ultima verifica fu effettuata da astronomi russi nel 1955, usando la luce proveniente da punti opposti del Sole in rotazione. Un margine del nostro Sole si muove costantemente verso di noi, mentre il margine opposto si allontana da noi. È stato scoperto che la luce proveniente da entrambi i margini viaggia verso la Terra colla stessa velocità. Verifiche simili si erano già avute decenni prima con la luce di stelle doppie rotanti. Indipendentemente dal moto della sorgente, la velocità della luce attraverso uno spazio vuoto è sempre la stessa: un po' più di 300.000 km/sec.

Vi rendete conto di come questa proprietà offra allo scienziato (lo chiameremo l'osservatore) un mezzo con cui determinare il proprio moto assoluto? Se la luce viaggia attraverso un etere immobile e stazionario con una certa velocità, *c*, e se questa velocità è indipendente dalla velocità della sorgente, allora la velocità della luce può essere usata come una specie di metro-campione per misurare il moto assoluto dell'osservatore. Un osservatore che si muova nello stesso verso di un raggio di luce troverà che il raggio gli passa accanto ad una velocità minore di *c*; un osservatore che si muova nel verso contrario ad un raggio di luce, troverà che il raggio gli viene incontro ad una velocità maggiore di *c*. In altre parole, le misure della velocità di un raggio di luce varierebbero, in conseguenza del moto dell'osservatore rispetto al raggio. Queste variazioni indicherebbero il suo moto vero, assoluto attraverso l'etere.

Per descrivere questa situazione, i fisici spesso usano l'espressione « vento d'etere ». Per capire che cosa intendano con essa, rifacciamoci a quel treno in movimento. Abbiamo visto come la velocità di un uomo che cammina sul treno a 3 chilometri all'ora è sempre identica rispetto al treno, sia che egli cammini verso la locomotiva o verso l'ultimo vagone. Lo stesso avviene per la velocità del suono in un vagone chiuso. Il suono è un moto ondulatorio trasmesso dalle molecole dell'aria. Dato che l'aria è trasportata dal vagone, il suono viaggerà verso nord con la stessa velocità (relativa al vagone) con cui viaggia verso sud.

La situazione cambia se passiamo dal vagone passeggeri chiuso a un carro merci scoperto. L'aria non è più imprigionata dentro il vagone. Se il treno si muove a 60 chilometri orari, ci sarà un vento a 60 chilometri orari che spazzerà il piano di carico. A causa di questo vento, la velocità del suono che va dalla coda del carro verso la testa sarà inferiore alla velocità normale. La velocità di un suono che proceda dalla testa del carro verso la coda sarà maggiore di quella normale.

I fisici del XIX secolo credevano che l'etere dovesse necessariamente comportarsi come l'aria che spazza un carro merci scoperto in movimento. Come potrebbe essere altrimenti? Se l'etere è immobile, ogni corpo che vi si muova attraverso deve incontrare un « vento d'etere » che soffia in senso opposto. La velocità della luce, misurata su un corpo in movimento, sarebbe naturalmente influenzata da tale vento d'etere.

La Terra sfreccia attraverso lo spazio, nel suo giro attorno al Sole, ad una velocità di circa 30 chilometri al secondo. Questo movimento, ragionavano i fisici, darebbe luogo ad un vento d'etere, che soffia attraverso la Terra e i suoi spazi interatomici a 30 chilometri al secondo. Per misurare il moto assoluto della Terra — il moto rispetto all'etere immobile — non ci sarebbe che da misurare la velocità della luce mentre viaggia avanti e indietro in diverse direzioni sulla superficie terrestre. Confrontando le diverse velocità della luce emessa in diverse direzioni, sarebbe

possibile calcolare la direzione e la velocità assolute del moto della Terra in qualsiasi dato istante. Un esperimento del genere fu proposto per la prima volta nel 1875, quattro anni prima della nascita di Einstein, dal grande fisico scozzese James Clerk Maxwell, nel suo articolo sull'*etere* nella nona edizione dell'*Enciclopedia Britannica.*

Nel 1881 Albert Abraham Michelson, a quel tempo giovane ufficiale della Marina Americana, fece appunto un esperimento del genere. Michelson era nato in Germania da genitori polacchi, ma il padre lo aveva portato in America all'età di due anni. Diplomatosi alla U. S. Naval Academy di Annapolis, dopo due anni di imbarco divenne insegnante di fisica e chimica all'Accademia. Una licenza gli permise di studiare in Europa. E all'Università di Berlino, nel laboratorio del famoso fisico tedesco Hermann von Helmholtz, il giovane Michelson fece il suo primo tentativo di scoprire il vento d'etere. Con sua grande sorpresa non riuscì a trovare nessuna differenza nella velocità della luce che viaggiava avanti e indietro in tutte le direzioni della bussola. Fu come se un pesce avesse scoperto di poter nuotare in qualsiasi direzione attraverso il mare senza riuscire a scoprire il movimento dell'acqua lungo il suo corpo; o come se un pilota potesse volare nella carlinga aperta di un aeroplano senza sentire vento in faccia.

Un illustre fisico austriaco di nome Ernst Mach (sentiremo ancora parlare di lui nel capitolo 7) da tempo criticava la no-

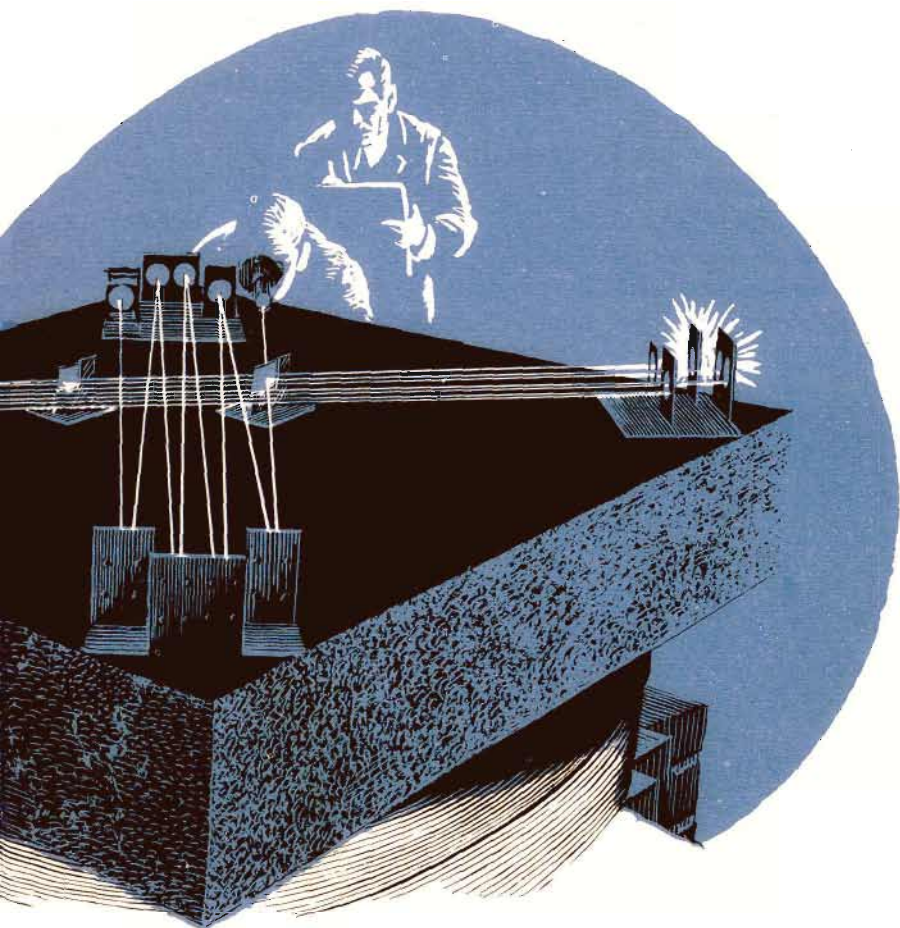
zione di moto assoluto attraverso l'etere. Lesse il resoconto scritto da Michelson su questo esperimento e decise immediatamente che il concetto di etere doveva venir abbandonato. La maggioranza dei fisici, invece, si rifiutò di compiere un passo così ardito. Michelson aveva fatto uso di un dispositivo rudimentale; c'erano buone ragioni di pensare che un esperimento preparato con più cura, con un apparecchio più sensibile, avrebbe dato dei risultati positivi. Lo stesso Michelson la pensava così. Era deluso dal « fallimento » della sua prova e ansioso di ricominciare.

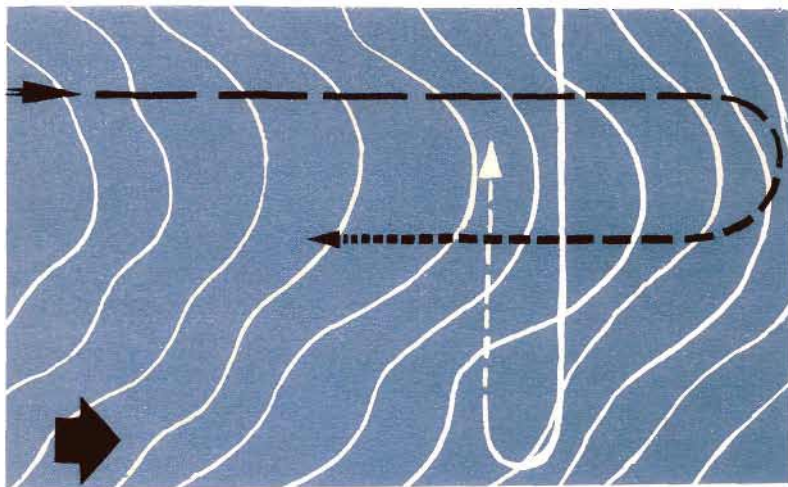
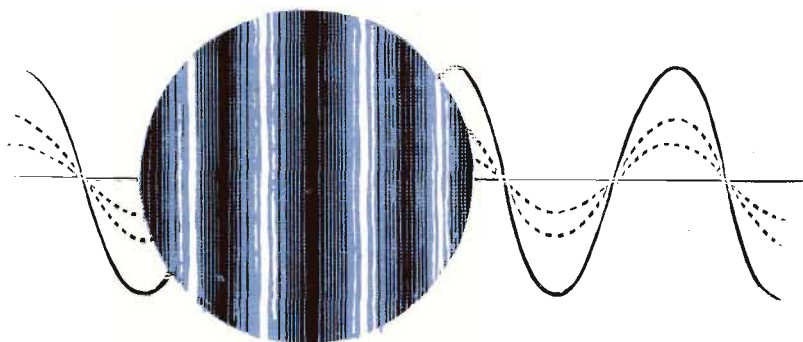
Michelson si dimise dalla Marina e divenne professore di fisica alla Case School of Applied Science (oggi il Case Institute) di Cleveland, Ohio. Nella vicina Western Reserve University, insegnava chimica Edward Williams Morley. I due uomini divennero buoni amici. « Esteriormente », scrive Bernard Jaffe nel suo libro *Michelson and the Speed of Light* [Michelson e la velocità della luce] « i due scienziati erano uno l'opposto dell'altro... Michelson si presentava bene, era ordinato, e sempre inappuntabile. Morley era, a dir poco, trasandato nell'aspetto e incarnava alla perfezione il tipo del professore distratto... Si lasciava crescere i capelli fino a che gli si arricciavano sulle spalle, e portava dei grandi baffi rossi ispidi che gli arrivavano fin quasi alle orecchie ».

Nel 1887, nel laboratorio al seminterrato di Morley, i due scienziati fecero un secondo più accurato tentativo di cogliere l'inafferrabile vento d'etere. Il loro esperimento, che divenne noto col nome di esperimento Michelson-Morley, segnò una delle tappe decisive della fisica moderna.

L'apparecchio fu montato su una lastra di pietra quadrata di quindici centimetri di lato e di circa quattro centimetri di spessore. La lastra galleggiava su mercurio liquido. Tale accorgimento eliminava le vibrazioni, manteneva la lastra orizzontale e permetteva di farla girare facilmente attorno a un perno centrale. Un sistema di specchi posti sulla lastra inviava un pennello di luce in una determinata direzione; e lo rifletteva avanti e indietro nella stessa direzione fino a fargli compiere otto viaggi

di andata e ritorno. E questo allo scopo di rendere più lungo possibile il cammino del raggio, pur mantenendo l'apparecchio su un congegno che potesse ruotare facilmente. Contemporaneamente il suddetto sistema di specchi inviava un raggio ad angolo retto col precedente e gli faceva compiere otto viaggi di andata e ritorno.

L'assunto era che, una volta che la lastra fosse stata rotata in modo che uno dei raggi viaggiasse avanti e indietro *parallela-*

mente al vento d'etere, questo raggio avrebbe impiegato a percorrere il suo cammino più tempo del raggio che percorreva la stessa distanza *perpendicolarmente* al vento. Ma il vento, vi chiederete, non farebbe forse aumentare la velocità in un verso della stessa quantità di cui la diminuirebbe nel verso opposto? Stando così le cose, gli aumenti e le diminuzioni si annullerebbero l'un l'altro, e il tempo per il cammino complessivo dovrebbe risultare lo stesso che se non ci fosse vento alcuno.

È vero: il vento farebbe aumentare la velocità della luce che va in un verso della stessa quantità di cui farebbe diminuire la velocità della luce procedente nel verso opposto, ma — e questo è il punto cruciale — il vento ritarderebbe la velocità *per un tempo più lungo*. Il calcolo mostra subito che l'intero percorso richiederebbe un tempo più lungo che se non vi fosse vento. Anche sul raggio che lo attraversa ad angolo retto, il vento avrebbe un effetto ritardante. Anche questo però può essere facilmente calcolato, e risulta che l'effetto ritardante è minore per il raggio che attraversa il vento perpendicolarmente che per quello che viaggia parallelamente ad esso.

Nessun dubbio, quindi, che *se* la Terra si muoveva attraverso un mare d'etere stagnante, ci sarebbe stato un vento d'etere, e che se c'era un vento d'etere, il dispositivo di Michelson-Morley lo avrebbe rivelato. Anzi, i due scienziati confidavano non solo di scoprire questo vento, ma anche di riuscire a determinare (facendo ruotare la lastra di pietra fino a trovare la differenza massima nei tempi impiegati dalla luce a compiere i due percorsi) l'esatta direzione, in ogni dato istante, della traiettoria della Terra attraverso l'etere.

Si osservi che il dispositivo di Michelson-Morley non misurava la velocità effettiva di ogni raggio di luce. I due raggi, compiuti i rispettivi cammini avanti e indietro, venivano riuniti in un unico raggio osservato attraverso un piccolo telescopio. Si ruotava poi lentamente il dispositivo. Ogni variazione nelle velocità relative dei due raggi provocherebbe un'alterazione nelle bande chiare e scure alternate di una frangia di interferenza.

Una volta ancora Michelson rimase sbalordito e deluso. E lo sbalordimento, questa volta, si comunicò ai fisici di tutto il mondo. Comunque girassero il loro dispositivo, Michelson e Morley non trovarono traccia di un vento d'etere! Mai, prima d'allora, nella storia della scienza i risultati negativi di un'esperienza erano stati tanto chiari e sconvolgenti. Ancora una volta Michelson ritenne fallito il suo esperimento, senza neanche sognarsi che proprio il « fallimento » avrebbe fatto del suo uno dei più riusciti e rivoluzionari esperimenti nella storia della scienza.

In seguito, Michelson e Morley ritentarono la prova con una attrezzatura ancora più sensibile. E altri fisici fecero lo stesso. La più accurata di tutte queste verifiche fu quella eseguita nel 1960 da Charles H. Townes della Columbia University. Il suo apparecchio, che si serviva di un dispositivo detto *maser* (un « orologio atomico » basato sulle vibrazioni delle molecole), era tanto sensibile che sarebbe riuscito a rivelare un vento d'etere anche se la Terra avesse avuto un millesimo della sua velocità reale. Non si trovò traccia di un simile vento.

I fisici rimasero dapprima così sbalorditi dall'esito negativo dell'esperimento Michelson-Morley che cominciarono ad inventare ogni sorta di spiegazioni per salvare la loro teoria del vento d'etere. Naturalmente, se l'esperimento fosse stato effettuato qualche secolo prima, come rileva G. J. Whitrow nel suo libro, *The Structure and Evolution of the Universe* [Struttura ed evoluzione dell'universo], una spiegazione elementare sarebbe immediatamente venuta in mente a tutti: la Terra non si muove! Ma questa ipotesi sembrò improbabile. La spiegazione migliore fu offerta da una teoria (molto precedente al primo esperimento Michelson-Morley) secondo la quale l'etere è trascinato dalla Terra, come l'aria in un treno chiuso. Ed era l'idea appunto di Michelson. Ma altri esperimenti, uno dei quali condotto da Michelson stesso, la fecero scartare.

La più strana di tutte le spiegazioni fu proposta da un fisico irlandese, George Francis FitzGerald. Forse, diceva, il vento d'etere esercita una pressione su un corpo in movimento, facendolo accorciare un poco nella direzione del moto. Per determinare la lunghezza di un oggetto in movimento, si deve moltiplicare la lunghezza che ha in quiete per la semplice formula seguente, in cui v^2 è la velocità dell'oggetto moltiplicata per se stessa, c^2 la velocità della luce moltiplicata per se stessa

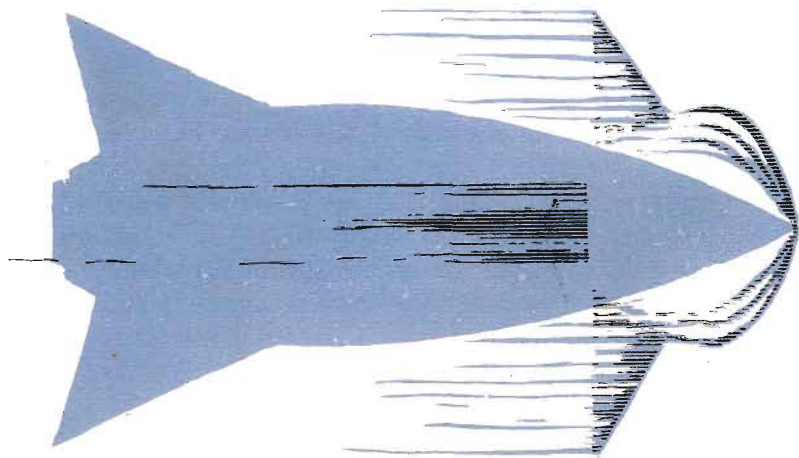
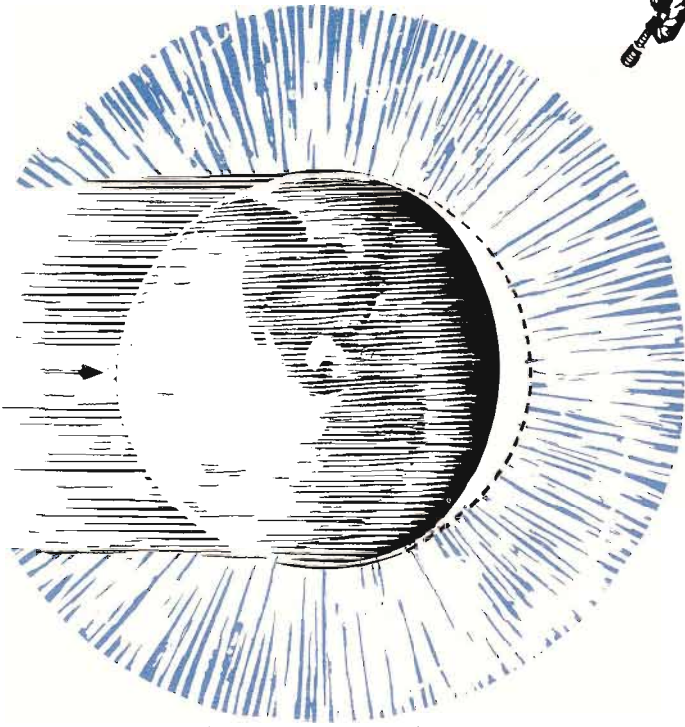
$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\,.$$

Studiando questa formula si noterà che la contrazione è trascurabile alle basse velocità, aumenta coll'aumentare della velocità, diventa grande quando la velocità del corpo è confrontabile con quella della luce. In tal modo, un'astronave fatta a forma di sigaro allungato, se si muovesse a grande velocità, assumerebbe la forma di un sigaro tozzo. La velocità della luce è un limite irraggiungibile; quando lo si raggiunge la formula diventa

$$\sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}}$$

che si riduce a zero. Moltiplicata per zero, la lunghezza dell'oggetto dà zero. In altri termini, se un corpo potesse raggiungere la velocità della luce, non avrebbe lunghezza nella direzione del moto!

La teoria di FitzGerald venne messa in elegante forma matematica dal fisico olandese Hendrik Antoon Lorentz, che, del tutto indipendentemente, aveva pensato alla stessa spiegazione (in seguito, Lorentz divenne uno dei più intimi amici di Einstein, ma a quel tempo non si conoscevano). La teoria divenne nota come la teoria della contrazione di Lorentz-FitzGerald (o di FitzGerald-Lorentz). È facile rendersi conto di come la teoria della contrazione possa spiegare il fallimento dell'esperimento Michelson-Morley. Se la lastra quadrata con tutto l'apparecchio si contraesse leggermente nella direzione in cui soffia il vento d'etere, la luce avrebbe complessivamente una distanza minore da percorrere. Anche se il vento avesse un maggior effetto ritardante sull'avanti e indietro del raggio, la maggiore brevità della strada permetterebbe al raggio di finire il suo percorso nello stesso tempo richiesto ove non vi fosse alcun vento ed alcuna contrazione. In altre parole, la contrazione sarebbe proprio sufficiente a mantener costante la velocità della luce, indipendentemente dalla direzione secondo cui è girato l'apparecchio di Michelson-Morley.

Perché mai, potreste chiedervi, non possiamo verificare questa teoria semplicemente misurando la lunghezza del dispositivo per vedere se si accorcia nella direzione del moto della Terra?

La risposta è che anche il regolo si accorcerebbe nella stessa proporzione. La misura risulterebbe quindi la stessa che se non vi fosse contrazione. La contrazione si applicherebbe a *tutto* sulla Terra in movimento. La situazione è analoga a quella dell'esperienza ideale di Poincaré (capitolo 1) in cui improvvisamente il cosmo diventa mille volte più grande, salvo che nella teoria di Lorentz-FitzGerald il mutamento avverrebbe in una sola direzione. Dato che il mutamento coinvolge tutto, non c'è modo di rivelarlo. Entro certi limiti (i limiti sono posti dalla topologia, lo studio delle proprietà che restano invariabili col deformarsi di un oggetto), anche la forma è relativa, come lo è la grandezza. La contrazione dell'apparecchio, come del resto la contrazione di ogni altra cosa sulla Terra, potrebbe essere percepita soltanto da qualcuno che si trovasse fuori della Terra e non partecipasse al suo moto.

Molti di coloro che hanno scritto sulla relatività hanno parlato della teoria di Lorentz-FitzGerald come di un'ipotesi *ad hoc.*

Questo, come osserva Adolf Grünbaum, non è rigorosamente vero. La teoria della contrazione era *ad hoc* solo nel senso che, a quel tempo, non c'era modo di verificarla. A rigor di logica, non è affatto *ad hoc*, tanto che, nel 1932, un importante esperimento, detto di Kennedy-Thorndike, la fece scartare definitivamente.

Roy J. Kennedy e Edward M. Thorndike, due fisici americani, rifecero l'esperimento Michelson-Morley, con questa fondamentale differenza: invece di costruire le due braccia dell'apparecchio di lunghezza quanto più possibile uguale, le costruirono di lunghezza quanto più possibile diversa. Il dispositivo veniva quindi rotato per vedere se ci fosse qualche cambiamento nella differenza tra i tempi impiegati dai due raggi di luce nel compiere i cammini di andata e ritorno nelle due direzioni. Secondo la teoria della contrazione, questa volta la differenza avrebbe dovuto variare quando il dispositivo ruotava. Questo cambiamento sarebbe stato rivelato (come nell'esperimento di Michelson) da spostamenti nelle frange di interferenza quando i due raggi venivano riuniti. Non fu notato nulla di simile.

Un modo ancora più semplice di verificare la teoria della contrazione sarebbe di fare delle misure « di sola andata » sulla velocità della luce; di cronometrare, cioè, la velocità lungo un percorso che ha la stessa direzione del moto della Terra e confrontarlo con la velocità lungo l'identico percorso ma in senso opposto. Evidentemente un raccorciamento del percorso non renderebbe impossibile, in questo caso, la scoperta di un vento d'etere, se un vento d'etere ci fosse. Ma fino alla recente scoperta dell'effetto Mössbauer (che sarà discusso nel capitolo 8), gravi difficoltà tecniche hanno impedito un esperimento del genere. Nel febbraio 1962, in una riunione della Royal Society di Londra, il professor Christian Möller dell'Università di Copenhagen spiegò come si potesse facilmente realizzare tale esperienza valendosi dell'effetto Mössbauer come di una sorgente di radiazione elettromagnetica, sistemando la sorgente e il ricevitore agli estremi opposti di una tavola girevole. L'esperienza, dichiarò Möller, smentirebbe l'originale teoria della contrazione. Quando

uscirà questo libro, essa avrà probabilmente già avuto luogo.

Sebbene ai suoi tempi non si potessero eseguire esperimenti di questo tipo, Lorentz si rese conto che in teoria erano ammissibili, e che c'erano buone ragioni di supporre che, come l'esperimento di Michelson, avrebbero dato dei risultati negativi. Per prevenire questa eventualità, Lorentz fece un'importante aggiunta alla sua teoria originale: introdusse dei cambiamenti nel ritmo del tempo. Gli orologi, disse, verrebbero rallentati da un vento d'etere, e proprio in un modo per cui la velocità della luce risulta sempre di 300.000 chilometri al secondo.

Per dare un esempio di come si svolgono le cose, immaginiamo che ci siano degli orologi di precisione sufficiente a render possibile la misurazione della velocità « di sola andata » della luce. La luce deve essere inviata da A a B lungo un cammino rettilineo che abbia la direzione del moto della Terra. Due orologi vengono sincronizzati in A, poi un orologio viene spostato in B. Si segna l'istante in cui la luce parte da A e l'istante (misurato sull'altro orologio) in cui il raggio ha raggiunto B. Poiché la luce viaggerebbe *contro* il vento d'etere, la sua velocità sarebbe rallentata e la durata del viaggio sarebbe un po' più lunga che se la Terra fosse in quiete. Vedete l'incrinatura di questa teoria? L'orologio, spostandosi da A a B, si muove esso pure contro il vento d'etere. E questo fa ritardare un po' l'orologio in B in modo che questo si trova un po' *indietro* rispetto all'orologio in A. Risultato: la velocità della luce viene cronometrata a 300.000 chilometri al secondo.

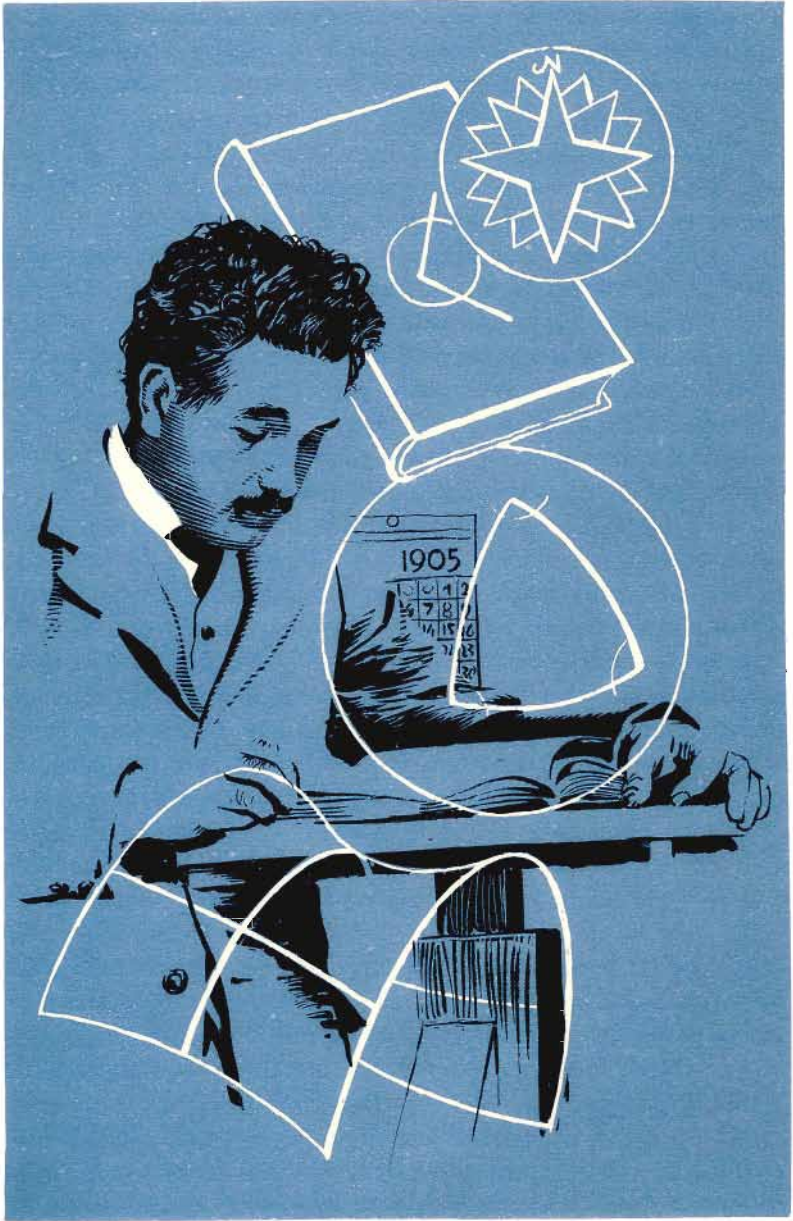
Lo stesso avviene (sosteneva Lorentz) se si misura la velocità della luce nel verso opposto, da B ad A. Due orologi sono sincronizzati in B, poi uno è spostato in A. Un raggio di luce viene inviato da B ad A, *nel senso* del vento d'etere. La velocità del raggio è accresciuta dal vento, perciò il tempo impiegato dalla luce a percorrere il cammino dovrebbe essere di una inezia inferiore al tempo impiegato se la Terra fosse in quiete. Però, spostando l'orologio da B in A, anch'esso si è mosso nel senso del vento. La diminuzione di pressione del vento d'etere sull'orologio in moto ha permesso all'orologio di guadagnare un

po' di tempo; perciò, a esperimento fatto, l'orologio in A è un po' *avanti* rispetto all'orologio in B. Risultato: una volta ancora la velocità della luce viene cronometrata in 300.000 chilometri al secondo.

La nuova teoria di Lorentz non solo spiegava i risultati negativi dell'esperimento di Michelson-Morley, ma di qualsiasi esperimento concepibile, designato a rivelare cambiamenti di velocità della luce derivanti da un vento d'etere. Le sue equazioni per le variazioni in lunghezza e in tempo furono stabilite in modo tale che qualsiasi metodo di misurazione della velocità della luce, in qualsiasi sistema di riferimento, avrebbe sempre dato lo stesso risultato. È facile capire perché i fisici non fossero soddisfatti di questa teoria. Era una teoria *ad hoc* nel pieno senso dell'espressione. Sembrava poco più di un bizzarro sforzo di rammendare gli strappi apertisi nella teoria dell'etere. Non si riusciva a immaginare come confermarla né come confutarla. I fisici trovavano difficile credere che, se un vento d'etere c'era, la natura avrebbe seguìto sentieri tanto curiosi, drastici, e addirittura burloni per impedire che venisse scoperto. Il filosofo-matematico inglese, Bertrand Russell, più tardi sintetizzò in modo acconcio la situazione citando questi versi della canzone del Cavaliere Bianco da *Attraverso lo Specchio* di Lewis Carroll:

> Il cervello mi stavo lambiccando
> Su come i baffi tingere di verde
> Ed usare un ventaglio tanto grande
> Che non riuscisse nessuno a vederli.

La nuova teoria di Lorentz, con i suoi cambiamenti di tempo di pari passo coi cambiamenti di lunghezza, sembrava quasi altrettanto assurda del programma del Cavaliere Bianco. Ma per quanti sforzi facessero, i fisici non erano capaci di pensare a niente di meglio.

Il prossimo capitolo mostrerà come la teoria della relatività ristretta di Einstein abbia indicato un'ardita e notevole via d'uscita da questa straordinaria confusione.

La teoria della relatività ristretta (parte prima)

Nel 1905, quando pubblicò il suo famoso studio su quella che poi divenne nota come la teoria della relatività ristretta, Albert Einstein era un giovane sposo ventiseienne, impiegato come tecnico presso l'Ufficio Brevetti Svizzero. La sua carriera di studente di fisica all'Istituto Politecnico di Zurigo non era stata sensazionale. Einstein aveva preferito leggere, pensare e sognare per conto proprio, piuttosto che imbottirsi la testa di cose non essenziali al solo scopo di prendere dei bei voti agli esami. Provò ad insegnare fisica, ma era un insegnante maldestro e perse diversi posti.

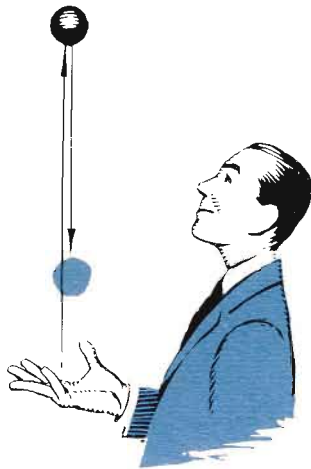
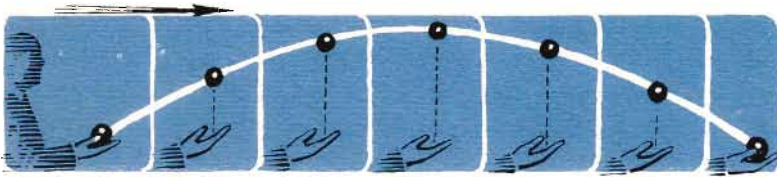
C'è un altro lato di questa storia. Fin da quando era un ragazzetto, Einstein aveva riflettuto profondamente sulle leggi fon-

damentali della natura. Le due più grandi « meraviglie » della sua infanzia, egli ricordava più tardi, furono: una bussola che il padre gli aveva mostrato quando aveva quattro o cinque anni, e un libro di geometria euclidea che aveva letto a dodici anni. Queste due « meraviglie » potrebbero simboleggiare l'intera vita di lavoro di Einstein: la bussola come simbolo della geometria fisica, la struttura di quel « grande mondo » al di fuori di noi, su cui non esiste per noi certezza assoluta; il libro come simbolo della geometria pura, una struttura assolutamente certa ma indipendente dal mondo reale. Prima dei sedici anni Einstein aveva già acquistato una padronanza della matematica fondamentale, compresa la geometria analitica e il calcolo.

Mentre lavorava all'Ufficio Brevetti Svizzero, Einstein leggeva e rifletteva su ogni sorta di problemi imbarazzanti che avessero a che fare con la luce e il moto. La sua teoria particolare fu un brillante tentativo di spiegare una grande quantità di esperimenti incomprensibili, incluso quello di Michelson-Morley, il più sorprendente ed il più noto di tutti. È importante rendersi conto come molti altri esperimenti avevano contribuito a creare uno stato di cose assai insoddisfacente circa la teoria sui fenomeni elettromagnetici. Anche se l'esperimento Michelson-Morley non avesse mai avuto luogo, la teoria della relatività ristretta sarebbe stata formulata egualmente. Naturalmente, se Michelson e Morley avessero trovato un vento d'etere, la teoria ristretta sarebbe stata scartata a priori. Ma il risultato negativo della loro prova fu soltanto uno degli elementi che condussero Einstein alla sua teoria.

Abbiamo visto come Lorentz e FitzGerald avevano cercato di salvare la teoria del vento d'etere col supporre che la pressione del vento provocasse, in qualche modo non ancora stabilito, un'effettiva contrazione fisica dei corpi in moto. Einstein, sulle orme di Ernst Mach, arrivò ad una conclusione più ardita. Il motivo per cui Michelson e Morley non avevano scoperto un vento d'etere, asserì Einstein, è semplice: *Il vento d'etere non c'è.* Einstein non negava l'etere; precisava soltanto che l'etere, se esiste, non è utile nella misurazione del moto uniforme.

La fisica classica — la fisica di Isaac Newton — ha dimostrato che se ci troviamo su un corpo che si muove di moto rettilineo uniforme, ad esempio il vagone di un treno completamente chiuso in modo che non si possa veder scorrere il paesaggio, non esiste alcun mezzo meccanico per accertare il nostro stato di moto.
Se lanciamo in aria verticalmente una palla, essa torna giù verticalmente, nel treno in moto, proprio come se fosse fermo. Se un osservatore situato a terra, fuori del vagone in movimento, potesse vedere attraverso le pareti del vagone, vedrebbe la traiettoria della palla come una curva. Ma per chi si trova sul vagone, la palla va verticalmente su e giù. È una fortuna che gli oggetti si comportino così, altrimenti non si riuscirebbe davvero a giocare né al tennis né al baseball. Ogni volta che si lancia una palla in aria, la Terra le si sposterebbe sotto alla velocità di 30 chilometri al secondo!

La teoria della relatività ristretta fa compiere un ulteriore passo in avanti alla relatività classica di Newton. Dice che oltre

a non poter scoprire il moto del treno tramite un esperimento *meccanico*, è anche impossibile scoprirne il moto mediante un esperimento *ottico*: e più precisamente mediante un esperimento con la radiazione elettromagnetica. La teoria ristretta si può sintetizzare così: se ci troviamo su un treno che si muove di moto uniforme e senza scosse, dobbiamo sbirciare dal finestrino qualche altro oggetto, un palo del telefono per esempio, per accertarci di essere in movimento; ed anche allora non possiamo dire con sicurezza se è il treno a passare accanto al palo o il palo a passare accanto al treno. Possiamo solo dichiarare che il treno e il suolo si muovono uno rispetto all'altro di moto uniforme.

Osservate la costante ripetizione, nell'ultimo periodo, della parola « uniforme ». Moto uniforme vuol dire moto in linea retta e a velocità costante. Il moto vario o *accelerato* è il moto che diventa più veloce o più lento (quando diventa più lento si dice che l'accelerazione è negativa), oppure il moto lungo una traiettoria non rettilinea. La teoria della relatività ristretta non ha nulla di nuovo da suggerire circa il moto accelerato.

La relatività del moto uniforme sembra innocua, ma in realtà ci fa piombare in uno strano nuovo mondo. Perché se non si riesce a misurare il moto uniforme rispetto ad un universale sistema di riferimento fisso, allora la luce si deve comportare in una maniera fantastica, contraria ad ogni esperienza.

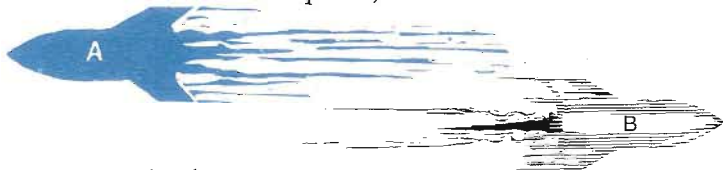
Consideriamo un astronauta che sulla sua nave spaziale corra lungo un raggio di luce. L'astronave viaggia a 150.000 chilometri al secondo, metà della velocità della luce. Con le opportune misurazioni, l'astronauta trova che il raggio gli passa accanto ancora con la sua solita velocità di 300.000 chilometri al secondo! Pensateci su per un momento e vi renderete subito conto che così dovrebbe essere se si scarta la nozione di un vento d'etere. Se l'astronauta constatasse che la luce rallenta in relazione al suo movimento, avrebbe scoperto proprio quell'etere che Michelson e Morley non erano riusciti a individuare. Analogamente, se la sua astronave muovesse direttamente verso una sorgente di luce, con la velocità di 150.000 chilometri al secondo, metà di quella della luce, troverebbe che il raggio gli viene incontro a velocità doppia? No, il raggio si muove an-

cora verso di lui a 300.000 chilometri al secondo. Indipendentemente da come si muove rispetto al raggio, il nostro astronauta otterrà sempre dalle sue misurazioni la stessa velocità per il raggio di luce.

Si sente spesso osservare che la teoria della relatività rende tutto relativo nella fisica, che distrugge ogni assoluto. Non c'è niente di più lontano dalla verità. La teoria della relatività rende relative cose che prima erano ritenute assolute, ma così facendo introduce dei nuovi assoluti. Nella fisica classica, la velocità della luce era relativa, nel senso che sembrava dover cambiare secondo il moto dell'osservatore. Nella teoria della relatività ristretta, la velocità della luce diventa, in questo senso, un nuovo assoluto. Non importa in che modo si muove una sorgente di luce, o come si muove un osservatore: la velocità della luce rispetto all'osservatore rimane costante.

Immaginate due astronavi, A e B, nel cosmo. Si muovono l'una verso l'altra di moto uniforme. Gli astronauti su ciascuna nave spaziale sono in grado di decidere quale delle situazioni seguenti è « vera » o « assoluta »?

1. L'astronave A è in quiete, B è in moto.

2. L'astronave B è in quiete, A è in moto.

3. Entrambe le astronavi sono in moto.

La risposta di Einstein è: no, non sono in grado. Un astronauta su una qualsiasi delle due navi può, se crede, considerare A come sistema fisso di riferimento. Non c'è esperimento di alcun genere, nemmeno di quelli che utilizzano la luce o altri fenomeni magnetici o elettrici, che dimostri che questa scelta è sbagliata. Lo stesso dicasi se decide di assumere B come sistema di riferimento. Se preferisce di considerare in moto tutte e due le astronavi, sceglie semplicemente un sistema di riferimento al di fuori delle due navi, un punto relativamente al quale entrambe le astronavi sono in moto. Non esiste il problema se una di queste scelte sia « giusta » e le altre « sbagliate ». Parlare di un moto assoluto di ciascuna di queste astronavi è una cosa priva di senso. C'è una sola realtà: un moto relativo che fa avvicinare le due astronavi a velocità uniforme.

In un libro come questo non è possibile addentrarsi in particolari tecnici della teoria ristretta, soprattutto nei particolari che ne implicano la matematica. Dobbiamo accontentarci di segnalare alcune delle conseguenze più sorprendenti che derivano logicamente da quelli che Einstein chiama i due « postulati fondamentali » della sua teoria:

1. Non c'è modo di stabilire se un corpo è in quiete o in moto uniforme rispetto ad un etere fisso.

2. Indipendentemente dal moto della sua sorgente, la luce si muove sempre attraverso lo spazio vuoto con la stessa velocità costante.

(Il secondo postulato non dovrebbe essere confuso, come spesso avviene, con la costanza della velocità della luce rispetto ad un *osservatore* in moto uniforme. Questa è una *deduzione* dai postulati).

Altri fisici, naturalmente, passarono al vaglio i due postulati. Lorentz aveva cercato di conciliarli mediante la sua teoria in cui le lunghezze e i tempi assoluti venivano alterati dalla pressione del vento d'etere. La maggioranza dei fisici li considerò un'offesa palese al senso comune, e preferì ritenere i postulati fra loro incompatibili, pensare che almeno uno di essi doveva essere falso. Einstein vagliò molto a fondo il problema.

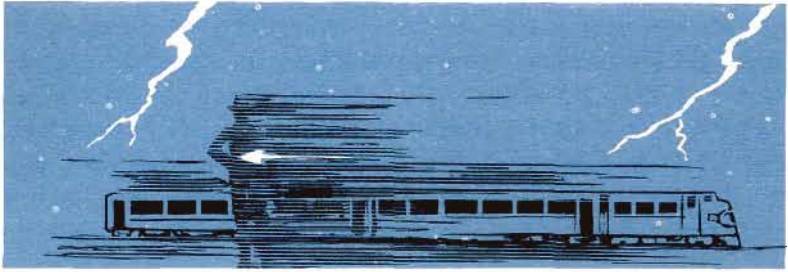
I postulati, affermò, erano incompatibili soltanto se ci si rifiutava di abbandonare il punto di vista classico che lunghezza e tempo fossero assoluti. Quando Einstein pubblicò la sua teoria, non sapeva che Lorentz aveva percorso una strada mentale simile alla sua, ma come Lorentz riconobbe che le misure di lunghezza e di tempo dovevano dipendere dal moto relativo dell'oggetto e dell'osservatore. Lorentz, però, era arrivato solo a mezza via: aveva conservato la nozione di lunghezza e di tempo assoluti per i corpi in quiete. Pensava che il vento d'etere alterasse la « vera » lunghezza e il « vero » tempo. Einstein si spinse fino in fondo. Non esiste, affermò, alcun vento d'etere. I concetti di lunghezza e di tempo assoluti sono privi di significato. Ecco la chiave della teoria ristretta di Einstein. Quando Einstein la adoperò, tutte le serrature cominciarono ad aprirsi.

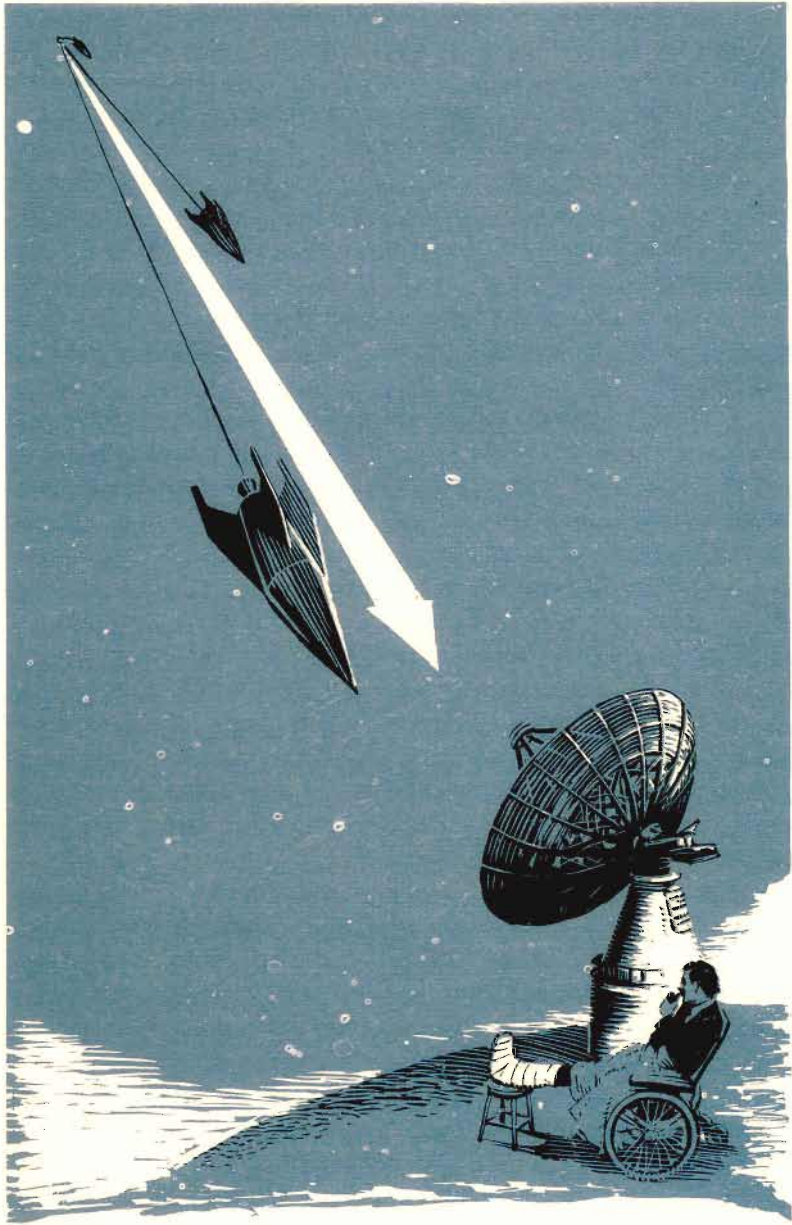
Una volta, per spiegare in maniera non tecnica la sua relatività ristretta, Einstein si servì di questa famosa esperienza

ideale. Immaginate, egli disse, un osservatore M in piedi accanto al binario della ferrovia. Ad una certa distanza, sul binario, c'è il punto A. Alla stessa distanza, ma nel verso opposto del binario, c'è un punto che chiameremo B. I due punti A e B sono colpiti contemporaneamente dal fulmine. L'osservatore sa che i due eventi sono simultanei, perché vede i due lampi nello stesso istante; e poiché egli si trova a metà strada fra A e B, e poiché la luce viaggia a velocità costante, calcola che il fulmine ha colpito contemporaneamente i due punti.

Adesso immaginate che quando il fulmine cade, ci sia un treno che passa a grande velocità sul binario, diretto da A verso B. Nell'istante in cui balenano i due lampi, un osservatore sul treno — che chiameremo M' — sia esattamente di fronte all'osservatore M sulla massicciata. Siccome M' si muove verso uno dei lampi e si allontana dall'altro, vedrà il lampo di B prima di vedere il lampo di A. Sapendo di essere in moto e tenendo in debito conto la velocità della luce, anche M' calcolerà che i due lampi sono avvenuti contemporaneamente.

E fin qui tutto va bene. Ma secondo i due postulati della teoria ristretta (confermati dall'esperimento Michelson-Morley), è del pari nostro diritto supporre che il treno sia in quiete mentre il suolo si muove rapidamente all'indietro sotto le sue ruote. Partendo da *questo* punto di vista, M', l'osservatore sul treno, concluderà che il lampo di B è scoccato realmente prima del lampo di A. Egli sa di trovarsi a metà strada tra i due lampi, e poiché si considera in quiete, è costretto a concludere che il lampo che ha visto per primo deve essersi prodotto prima del lampo che ha visto per secondo.

M, l'osservatore al suolo, è costretto a convenirne. È vero che vede balenare i due lampi come se fossero simultanei, ma ora è *lui* che si suppone in movimento. E una volta tenuto conto della velocità della luce, e del fatto che si sta muovendo verso il lampo di A e allontanando dal lampo di B, calcolerà che il lampo di B deve essere avvenuto prima.

Siamo portati a concludere, perciò, che non si può dare una risposta assoluta alla domanda se i due lampi sono simultanei. La risposta dipende dalla scelta del sistema di riferimento. Naturalmente, se due eventi si verificano contemporaneamente *nello stesso punto*, si può affermare in modo assoluto che sono simultanei. Quando due aeroplani si scontrano fra cielo e terra, non c'è sistema di riferimento secondo il quale l'urto dei due apparecchi risulti non simultaneo. Ma maggiore è la distanza fra due eventi, maggiore la difficoltà di deciderne la contemporaneità. È importante comprendere che non si tratta semplicemente di incapacità di conoscere la verità della cosa. *Non esiste la verità reale della cosa.* Non c'è un tempo assoluto in tutto l'universo secondo cui si possa misurare la contemporaneità assoluta. La contemporaneità assoluta di eventi distanti fra loro è un concetto senza significato.

Quanto sia radicale questa nozione, può essere messo in rilievo con un'esperienza ideale in cui entrino in gioco immense distanze e velocità enormi. Immaginiamo che qualcuno sul Pianeta X, in un'altra parte della nostra Galassia, stia cercando di comunicare con la Terra. Egli invia un messaggio radio; e cioè, ovviamente, un'onda elettromagnetica che si propaga attraverso lo spazio con la velocità della luce. Supponiamo che la Terra e il Pianeta X distino 10 anni luce, il che significa che ci vogliono 10 anni perché questo messaggio raggiunga la Terra. Dodici anni prima di captare il messaggio sulla Terra, il radioastronomo ha ottenuto il Premio Nobel. La teoria ristretta ci permette di dire senza riserva che il premio gli è stato conferito *prima* che dal Pianeta X venisse inviato il messaggio.

Dieci minuti dopo aver ricevuto il messaggio, l'astronomo starnutisce. La teoria ristretta ci permette anche di dichiarare, senza riserva e per tutti gli osservatori in qualsiasi sistema di riferimento, che l'astronomo ha starnutito *dopo* che dal Pianeta X è stato inviato il messaggio.

Supponete ora che in qualche momento di questi 10 anni, mentre il radiomessaggio stava viaggiando verso la Terra (diciamo 3 anni prima che il messaggio fosse captato), l'astronomo sia caduto dal suo radiotelescopio e si sia rotto una gamba. La teoria ristretta *non* ci permette di asserire con sicurezza se l'astronomo si è rotto la gamba prima o dopo l'invio del messaggio dal Pianeta X.

Il motivo è questo. Un osservatore che lasciasse il Pianeta X nel momento in cui viene spedito il messaggio e che viaggiasse verso la Terra ad una velocità che dalla Terra fosse giudicata piccola, troverebbe (secondo le sue misure del passare del tempo) che l'astronomo si è rotto la gamba *dopo* l'invio del messaggio. Naturalmente arriverebbe sulla Terra molto dopo la ricezione del messaggio, forse secoli dopo.

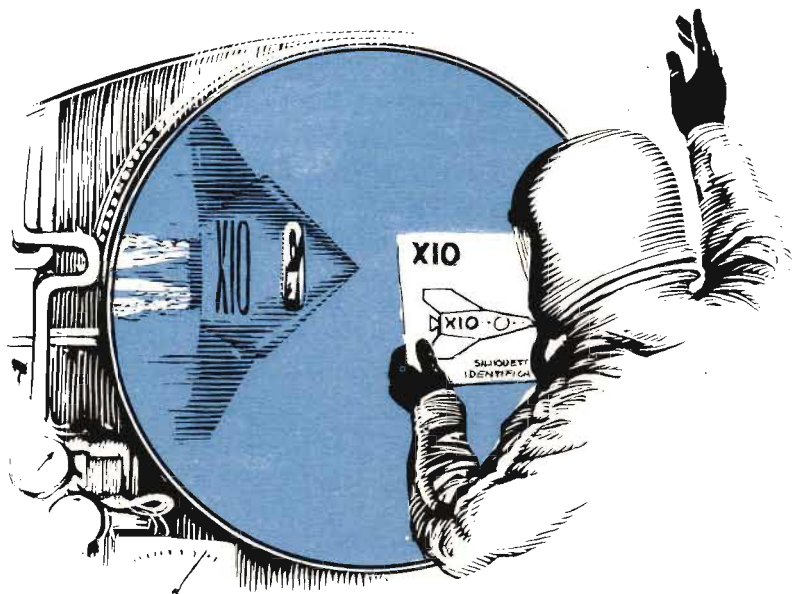
Ma quando calcolasse la data in cui fu mandato il messaggio, gli risulterebbe, dal suo orologio, anteriore a quella in cui l'astronomo si è rotto la gamba. D'altra parte, un altro osservatore che a sua volta lasciasse il Pianeta X contemporaneamente al messaggio, ma viaggiando ad una velocità molto vicina a quella della luce, troverebbe che l'astronomo si è rotto la gamba *prima* dell'invio del messaggio. Invece di impiegare secoli a compiere il viaggio, impiegherà, diciamo, solo un'inezia più di 10 anni come sono calcolati sulla Terra. Ma a causa del rallentamento del tempo sull'astronave in moto rapidissimo, sembrerà all'astronauta di aver fatto il viaggio soltanto in pochi mesi. Gli diranno, sulla Terra, che l'astronomo si è rotto la gamba un po' più di tre anni prima. Secondo l'orologio dell'astronauta, il messaggio è stato spedito pochi mesi prima. Concluderà che la rottura della gamba è anteriore di alcuni anni all'invio del messaggio dal Pianeta X.

Se l'astronauta viaggiasse alla velocità della luce (natural-

mente ciò è puramente ipotetico, non è possibile in realtà), il suo orologio si fermerebbe completamente. All'astronauta sembrerebbe di aver fatto il viaggio in un tempo zero. Dal suo punto di vista i due eventi, l'invio del messaggio e la sua ricezione, sarebbero simultanei. *Tutti* gli eventi accaduti sulla Terra durante il periodo di 10 anni gli sembrerebbero anteriori all'invio del messaggio. Ora, secondo la teoria ristretta non c'è un sistema di riferimento « privilegiato »: non c'è un motivo per preferire il punto di vista di un osservatore a quello di un altro. I calcoli fatti dall'astronauta in moto veloce sono altrettanto legittimi, altrettanto « veri », dei calcoli fatti dall'astronauta che viaggia a bassa velocità. Non esiste un tempo universale, assoluto, a cui fare appello per risolvere le divergenze fra i due astronauti.

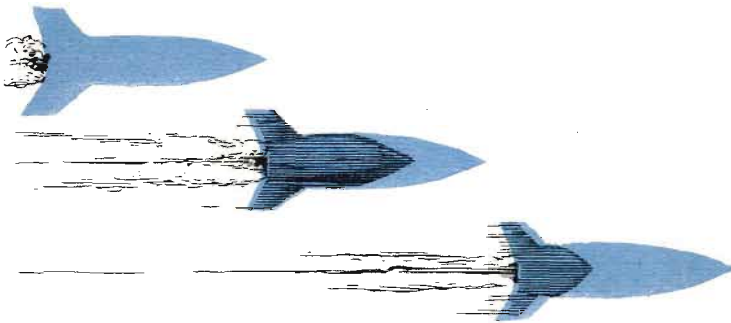
Il crollo della nozione classica di contemporaneità assoluta è, con tutta probabilità, l'aspetto più « stupendamente inaspettato » della teoria ristretta. (La frase « stupendamente inaspettato » l'abbiamo presa a prestito da un recente discorso sulla relatività tenuto dal fisico nucleare Edward Teller). Newton accettò come cosa vera che un tempo universale permeasse l'intero cosmo. E così fecero Lorentz e Poincaré. E *questo* impedì loro di scoprire la teoria ristretta prima di Einstein! Einstein genialmente intese che non si poteva formulare la teoria in forma pregnante e logicamente coerente senza abbandonare completamente la nozione di un tempo cosmico universale.

Ci sono, dice Einstein, soltanto tempi locali sulla Terra, ad esempio, ciascuno è trasportato attraverso lo spazio alla stessa velocità; perciò gli orologi marciano tutti allo stesso « tempo terrestre ». Un tempo locale di questo tipo, per un corpo in movimento come la Terra, si chiama il « tempo proprio » di quel corpo. C'è ancora un « prima » e « dopo » assoluto (ovviamente nessun astronauta morirà prima di essere nato), ma, quando gli eventi sono separati da grandi distanze, ci sono lunghi intervalli di tempo entro i quali non è possibile dire quale di due eventi preceda l'altro. La risposta dipende dal moto dell'osservatore relativamente ai due eventi. Naturalmente la de-

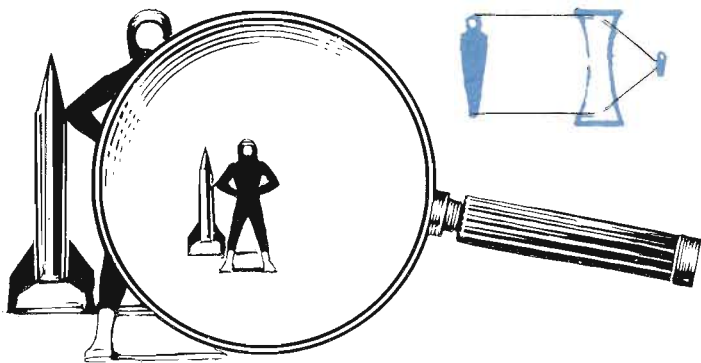
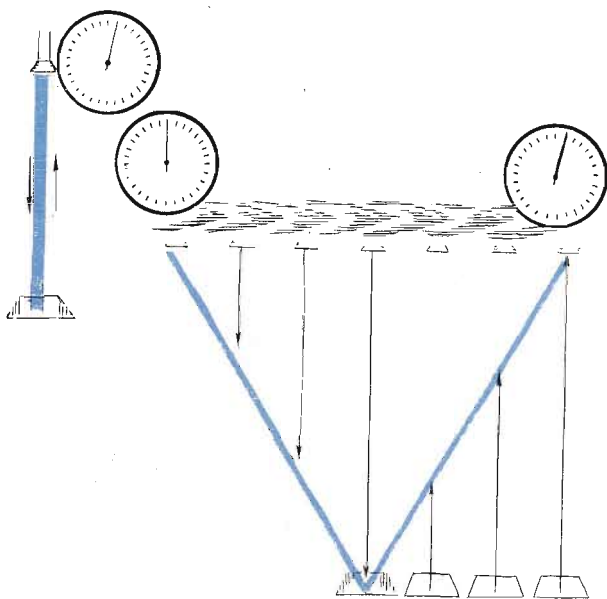
cisione raggiunta da un osservatore è altrettanto « vera » della decisione differente raggiunta da un altro osservatore. Tutto questo discende con ferrea logica dai postulati fondamentali della teoria ristretta.

Quando il concetto di contemporaneità cade, altri concetti cadono con esso. Il tempo, naturalmente, diventa relativo, perché osservatori diversi danno valutazioni differenti del tempo che intercorre tra i medesimi due eventi. Anche la lunghezza diventa relativa. La lunghezza di un treno in moto non può essere misurata se non si conosce esattamente dove si trovano i due estremi *nel medesimo istante.* Se una persona ci riferisce che alle ore 1.00 la testa del treno si trovava proprio di fronte a lui e che la coda distava un miglio, lungo il binario, in qualche istante fra le 12.59 e le 1.01, questo, evidentemente, non è un modo di determinare l'esatta lunghezza del treno. In altri termini, per una misura accurata delle distanze e delle lunghezze degli oggetti in moto è essenziale disporre di un metodo per sta-

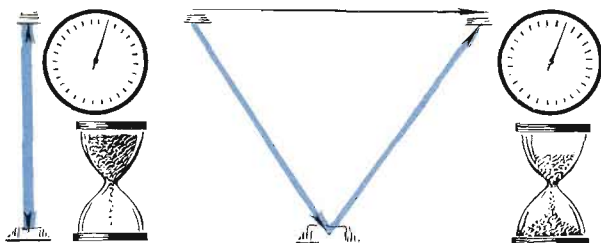
bilire l'esatta contemporaneità. In mancanza di tale metodo, le lunghezze dei corpi in moto vengono a dipendere dalla scelta del sistema di riferimento.

Ad esempio, se due astronavi sono in movimento una rispetto all'altra, all'osservatore su ciascuna di esse l'altra astronave apparirebbe leggermente accorciata nella direzione del moto. Alle velocità ordinarie questo accorciamento è minimo. La Terra, che gira attorno al Sole con la velocità di 30 chilometri al secondo, apparirebbe ad un osservatore in quiete relativamente al Sole, accorciata di qualche centimetro appena (circa 6,4). Quando però le velocità relative sono molto alte il cambiamento diventa considerevole. Fortunatamente le stesse formule di trasformazione stabilite da FitzGerald e da Lorentz per spiegare l'esperienza di Michelson-Morley, possono essere applicate qui. Nella teoria della relatività questo accorciamento è ancora chiamato la contrazione di Lorentz-FitzGerald, ma si farebbe meno confusione se avesse un altro nome, perché Einstein diede alle formule della trasformazione un'interpretazione fondamentalmente diversa.

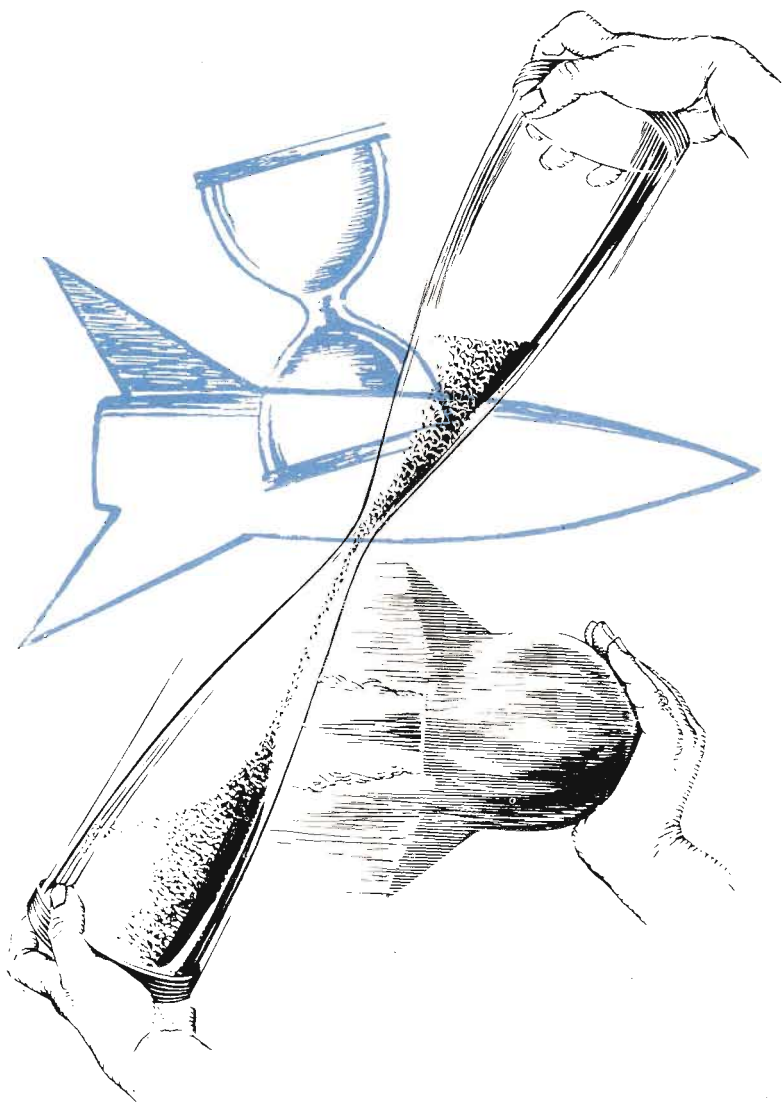
Per Lorentz e FitzGerald la contrazione era un mutamento fisico dovuto alla pressione del vento d'etere. Per Einstein essa ha invece e solamente a che fare con i risultati delle misure: in questo caso, la misura della lunghezza di un'astronave eseguita dai cosmonauti che si trovano sull'altra. Gli osservatori su ognuna

delle due navi spaziali non rilevano alcuna variazione nella lunghezza della propria nave, come pure nelle lunghezze degli oggetti che vi si trovano dentro. Quando misurano l'altra astronave, però, la trovano più corta. Lorentz e FitzGerald pensavano ancora che i corpi in moto avessero delle « lunghezze di quiete » (o « lunghezze a riposo ») assolute. Quando i corpi si contraevano, non avevano più le loro « vere » lunghezze. Einstein, abbandonando l'idea dell'etere, tolse ogni significato al concetto di lunghezza assoluta. Quel che rimaneva era la *lunghezza come è misurata*, e questa risultò variare con la velocità relativa di oggetto e osservatore.

Come è possibile, vi domandate ora, che ognuna di queste astronavi sia più corta dell'altra? Ma questa non è la maniera giusta di porre la domanda. La teoria non dice che ciascuna nave sia più corta dell'altra: la teoria dice che i cosmonauti su ciascuna nave *misurando* l'altra la trovano più corta. Questa è tutt'altra questione. Se due persone si trovano da parti opposte di una enorme lente concava, ciascuno vede l'altra come se fosse più piccola; ma questo non è dire che ciascuna *è* più piccola.

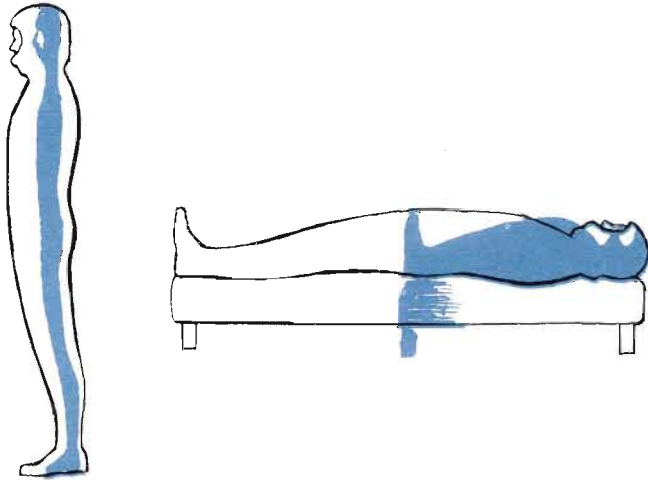
Oltre alle apparenti variazioni di lunghezza, ci sono variazioni apparenti delle durate temporali. I cosmonauti su ciascuna

astronave troveranno che gli orologi sull'altra ritardano. Una semplice esperienza ideale mostra che deve succedere proprio così. Immaginate di guardare fuori, dall'oblò di un'astronave nell'oblò di un'altra. Una di queste astronavi sta passando accanto all'altra ad una velocità vicina a quella della luce. Mentre si incrociano, sull'altra astronave viene mandato un raggio di luce dal soffitto al pavimento, e di qui, con uno specchio, riflesso nuovamente verso il soffitto. La traiettoria di questo raggio voi la vedreste a forma di V. E se aveste degli strumenti abbastanza sensibili (naturalmente non esistono strumenti del genere) potreste cronometrare il tempo impiegato da questo raggio di luce per percorrere questo cammino a forma di V. Dividendo la lunghezza del percorso per il tempo impiegato ottenete la velocità della luce.

Supponete ora che, mentre state cronometrando il tempo impiegato dal raggio di luce nel suo percorso a V, un cosmonauta nell'altra astronave stia facendo la stessa cosa. Dal suo punto di vista, assunta la *sua* astronave come sistema di riferimento, la luce va semplicemente in giù e poi di nuovo in su lungo la stessa retta, compiendo un percorso ovviamente minore di quello a V da voi osservato. Dividendo la distanza per il tempo impiegato dal raggio ad andare in giù e tornare in su, anche questo cosmonauta ottiene la velocità della luce. Poiché la velocità della luce è costante per tutti gli osservatori, egli deve ottenere esattamente l'identico vostro risultato finale: 300.000 chilometri al secondo. Ma il percorso del suo raggio è più breve. Come si può avere lo stesso risultato? Non c'è che una sola spiegazione possibile: il suo orologio è più lento. Naturalmente la situazione è perfettamente simmetrica. Se mandate un raggio in giù e in su nella vostra astronave, egli ne vedrà la traiettoria a forma di V. E dedurrà che il *vostro* orologio è più lento.

Il fatto che questi sbalorditivi cambiamenti di lunghezza e di durata temporale siano chiamati « apparenti » non significa che ci siano una lunghezza o una durata « vere » che semplicemente « appaiano » differenti a osservatori diversi. Lunghezza e tempo sono concetti relativi; non hanno significato se non di relazione di un oggetto con l'osservatore. Non è che una serie di misure sia « vera », e un'altra serie sia « falsa ». Ognuna

è vera relativamente all'osservatore che esegue le misure; relativamente al suo sistema di riferimento. *In nessun modo le misure possono essere più vere di così.* E non si tratta affatto di illusioni ottiche, da far spiegare ad uno psicologo. Possono essere registrate dagli strumenti; non richiedono un osservatore *vivente.*

Anche la massa è un concetto relativo, ma dobbiamo differire questa ed altre questioni al prossimo capitolo.

La teoria della relatività ristretta
(parte seconda)

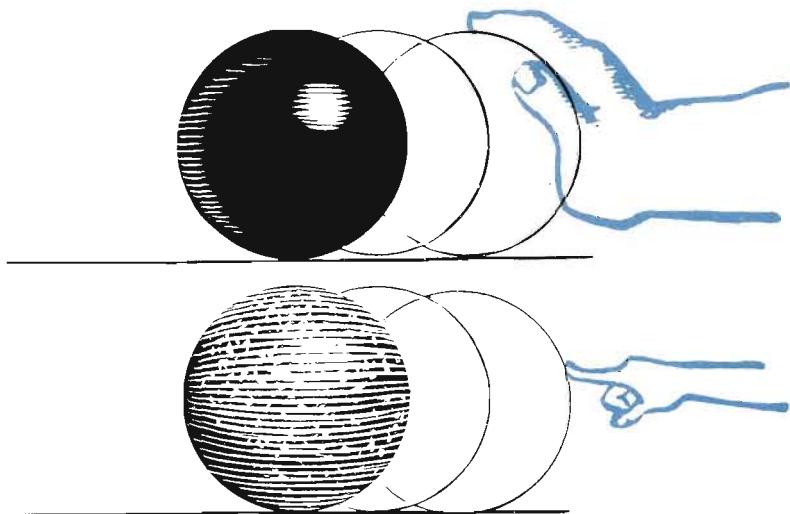
Lunghezza e tempo, come si è mostrato nel capitolo precedente, sono concetti relativi. Se due astronavi si incrociano a velocità uniforme, gli osservatori su ognuna trovano i cosmonauti dell'altra più sottili e più lenti nei movimenti. Se la velocità relativa è grande abbastanza, daranno l'impressione di muoversi come gli attori di un film proiettato al rallentatore. Tutti i fenomeni con moto periodico sembreranno procedere a ritmo ridotto: i diapason, gli orologi a bilanciere, le pulsazioni cardiache, le vibrazioni degli atomi, e via di seguito. Come ebbe occasione di dire una volta Arthur Stanley Eddington, un illustre astronomo inglese divenuto uno dei primi e più ardenti seguaci di Einstein, persino i sigari sull'altra astronave sembre-

ranno durare più a lungo. Un cosmonauta alto un metro e ottanta, ritto in piedi su un'astronave che si muova orizzontalmente, apparirà ancora alto un metro e ottanta, ma il suo corpo sembrerà più sottile secondo la direzione del moto. Se si corica con il corpo allineato secondo la direzione del moto, il suo spessore ritornerà normale, ma egli sembrerà ora più corto dalla testa ai piedi.

Se due astronavi potessero davvero incrociarsi ad una velocità abbastanza grande da rendere sensibili questi cambiamenti, difficoltà tecniche di ogni tipo impedirebbero in pratica agli osservatori su ciascuna nave di *vedere* tali cambiamenti. Agli scrittori piace spiegare la relatività con illustrazioni « drammatiche » ultrasemplificate. Queste vivide illustrazioni non descrivono cambiamenti realmente percepibili, né dall'occhio umano né da qualsiasi strumento attualmente noto. Si devono pensare come cambiamenti che, in linea di principio, potrebbero essere dedotti dagli astronauti sulla base di misure effettuate con strumenti sufficientemente potenti e dopo aver fatto le correzioni necessarie per la velocità della luce.

Oltre ai cambiamenti nella lunghezza e nella durata temporale, ci sono anche cambiamenti relativistici nella massa. La

massa è, approssimativamente parlando, una misura della quantità di materia che costituisce corpo. Una palla di piombo ed una di sughero possono avere stessa grandezza, ma la prima ha massa maggiore; contiene maggior concentrazione di materia.

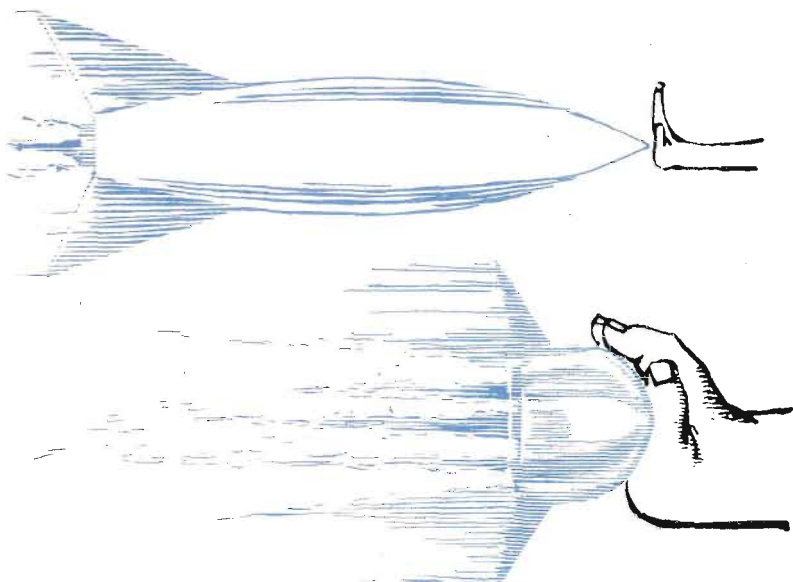
Ci sono due modi di misurare la massa di un corpo. Si può pesarlo oppure si può determinare la forza necessaria per farlo accelerare di una data quantità. Il primo metodo non è molto buono, perché i risultati variano secondo la diversa forza di gravità locale. Una palla di piombo, trasportata sulla cima di un'alta montagna, peserà un pochino meno di prima, sebbene la massa rimanga esattamente la stessa. Sulla Luna avrebbe un peso considerevolmente minore che sulla Terra; su Giove il suo peso sarebbe considerevolmente maggiore.

Il secondo metodo di misurare le masse dà lo stesso risultato indipendentemente dal fatto che ci si trovi sulla Terra, sulla Luna o su Giove; ma è soggetto ad un diverso e più strano tipo di variazione. Per determinare con questo metodo la massa di un oggetto in moto, si deve misurare la forza richiesta per farlo accelerare di una certa quantità. È chiaro che occorrerà una spinta più forte per mettere in moto una palla da cannone che per mettere in moto una palla di sughero. La massa misurata in questo modo si chiama *massa inerziale* (o inerte) per distinguerla dalla *massa gravitazionale* o peso. Misure di questo tipo non sono possibili senza effettuare misure di tempo e di distanza.

La massa inerte, ad esempio, di una palla di cannone è espressa dalla quantità di forza richiesta per aumentarne la velocità di un tanto per unità di tempo: le misure di tempo e di distanza variano con la velocità relativa di oggetto o osservatore. Ne risulta che anche le misure della massa inerziale variano.

Nel capitolo 6 ritorneremo sul concetto di massa gravitazionale e sulla sua relazione con la massa inerte. Qui ci occupiamo soltanto della massa inerte come è misurata da un osservatore. Per degli osservatori in quiete relativamente ad un oggetto — ad esempio, dei cosmonauti che trasportino un elefante sulla loro astronave — la massa inerte dell'oggetto rimane la stessa indipendentemente dalla velocità con cui la nave spaziale sta viaggiando. La massa dell'elefante, quale è misurata da questi osservatori, è detta la sua *massa propria* o *massa a riposo*. La massa inerte dello stesso elefante, misurata da un osservatore in moto relativamente all'elefante (ad esempio, da un osservatore sulla terra) è detta la *massa relativistica* dell'elefante. La massa a riposo di un corpo non varia mai. La sua massa relativistica, sì. Entrambe sono misure della massa inerte. In questo capitolo ci occupiamo della massa inerte e la parola « massa » deve essere intesa in questa accezione.

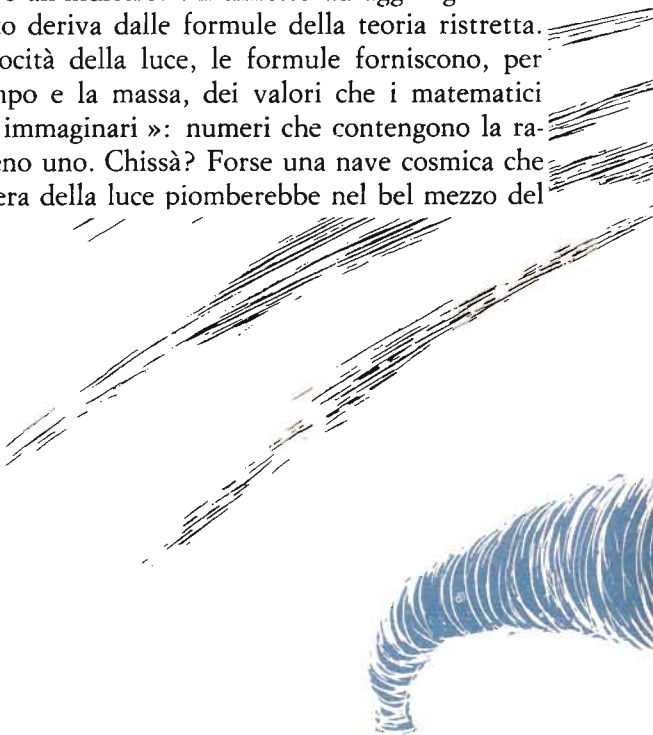
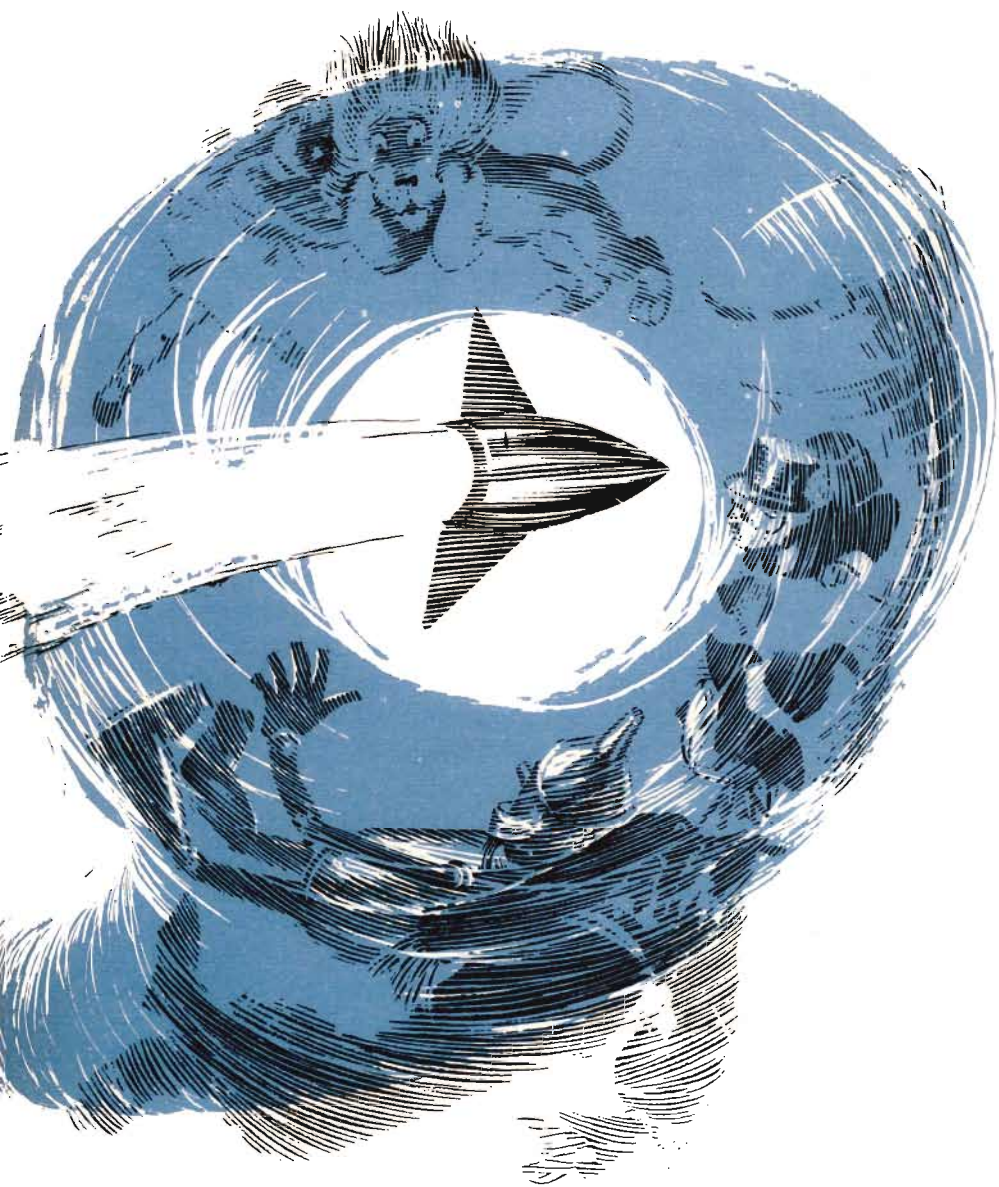
Le tre variabili — lunghezza, tempo, massa — sono regolate tutte dallo stesso coefficiente di contrazione di Lorentz dato a pag. 26. La lunghezza ed il ritmo degli orologi variano nella stessa proporzione diretta, così la formula è identica per entrambe. La massa e la durata degli intervalli di tempo sono in proporzione inversa, e ciò significa che la formula va scritta così:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

La massa di un corpo, misurata da un osservatore in moto uniforme relativamente ad esso, si ottiene moltiplicando la massa a riposo del corpo per la formula ora scritta (dove v è la velocità relativa del corpo, c la velocità della luce).

Per esempio, se la velocità relativa di due astronavi è 259.000 chilometri circa al secondo, gli osservatori su ciascun veicolo vedranno l'altro lungo la metà, il ritmo degli orologi ridotto a metà, e la sua massa grande il doppio. Naturalmente, i cosmonauti troveranno tutto perfettamente normale dentro la propria astronave. Se i due veicoli spaziali riuscissero a raggiungere una velocità relativa uguale a quella della luce, gli osservatori su ciascuna astronave penserebbero che l'altra si è accorciata fino ad avere una lunghezza zero, ha assunto una massa infinita, e che il tempo su di essa è fermato del tutto!

Se la massa inerte non variasse in questo modo, allora l'applicazione continua di una forza, quale la forza fornita da motori a razzo, potrebbe far aumentare continuamente la velocità di un veicolo fino a superare la velocità della luce. Questo non può accadere, perché man mano che la nave procede più veloce (dal punto di vista, diciamo, di un osservatore sulla Terra), la sua massa relativistica continua a crescere nella stessa proporzione in cui la sua lunghezza e il ritmo del suo tempo decrescono. Quando la nave cosmica si è accorciata fino ad essere lunga un decimo della sua lunghezza a riposo, la sua massa relativistica è divenuta dieci volte più grande. La nave oppone allora una resistenza dieci volte maggiore ai suoi motori a razzo; perciò è richiesta una

forza dieci volte più grande di quella che sarebbe richiesta se la nave fosse in quiete per produrre un uguale aumento di velocità. La velocità della luce non può mai essere raggiunta. Se venisse raggiunta, l'osservatore esterno troverebbe che la cosmonave si è ridotta a lunghezza zero, ha assunto una massa infinita, e sta esercitando una forza infinita con i suoi motori a razzo. I cosmonauti alloggiati dentro la nave non osserverebbero i cambiamenti in se stessi, ma troverebbero il cosmo proiettato indietro alla velocità della luce, il tempo cosmico stagnante, tutte le stelle appiattite come dischi e di massa infinita.

Soltanto uno scrittore di fantascienza oserebbe immaginarsi quello che potrebbero osservare i cosmonauti da un'astronave che si muovesse più velocemente della luce. Forse il cosmo darebbe l'impressione di essere rivoltato e divenuto il simmetrico di se stesso, le stelle prenderebbero massa negativa, e il tempo cosmico si evolverebbe all'indietro. Mi affretto ad aggiungere che nulla di tutto questo deriva dalle formule della teoria ristretta. Se si supera la velocità della luce, le formule forniscono, per la lunghezza, il tempo e la massa, dei valori che i matematici chiamano « numeri immaginari »: numeri che contengono la radice quadrata di meno uno. Chissà? Forse una nave cosmica che infrangesse la barriera della luce piomberebbe nel bel mezzo del paese di Oz!

Dopo aver imparato che nulla può superare la luce, lo studioso della relatività che sia ancora ai primi passi rimane spesso perplesso quando si imbatte in accenni a velocità superiori a quella della luce. Per comprendere esattamente quanto ha da dirci a questo riguardo la relatività, sarà meglio introdurre il termine « sistema inerziale » (o, come lo chiamavano i primi scrittori sulla relatività, « sistema galileiano »). Quando un corpo, come una cosmonave, è in moto uniforme, si dice che quel corpo e tutti i corpi che si muovono con esso nella stessa direzione ed alla stessa velocità (come tutti gli oggetti dentro alla nave), sono ancorati allo stesso sistema inerziale. (Per usare un frasario tecnico, il sistema inerziale è il sistema di coordinate cartesiane a cui è ancorata l'astronave). Fuori dalla struttura di uno specifico sistema inerziale, la teoria ristretta non si applica più e si possono osservare in molti modi velocità maggiori di quella della luce.

Considerate, ad esempio, questo caso semplicissimo. Un'astronave, viaggiando a una velocità tre quarti di quella della luce, passa sopra di noi diretta verso est. Nello stesso istante un'altra astronave, che viaggia egualmente a tre quarti della velocità della luce, passa sopra di noi diretta ad ovest. Relativamente al nostro sistema di riferimento, solidale col sistema inerziale della Terra, le due navi si incrociano con una velocità relativa grande una volta e mezza quella della luce. Si avvicinano a questa velocità, e si allontanano a questa velocità. Non c'è nulla nella teoria della relatività che lo neghi.

Però, la teoria ristretta dice che *se vi trovaste a viaggiare in una di esse* calcolereste che la velocità relativa delle due navi è minore di quella della luce.

Facciamo del nostro meglio, in questo libro, per evitare la matematica della relatività, ma come la formula della contrazione di Lorentz, la formula seguente è troppo semplice perché valga la pena di tralasciarla. Se x è la velocità di un veicolo spaziale relativa alla Terra e y è la velocità relativa alla Terra dell'altro veicolo, allora la velocità rispettiva delle due navi una rispetto all'altra, *come è vista dalla Terra*, è, naturalmente $x+y$. Ma se-

condo il punto di vista di un osservatore sull'altro veicolo, la somma delle velocità va fatta con la formula seguente:

$$\frac{x+y}{1+\frac{xy}{c^2}}$$

In questa formula c è la velocità della luce. È facile rendersi conto che quando le velocità delle due astronavi sono piccole paragonate a quella della luce, la formula dà un risultato quasi uguale a quello ottenuto sommando le due velocità nel solito modo. Ma se le velocità delle astronavi sono molto grandi, la formula dà un risultato del tutto diverso. Prendiamo il caso limite e supponiamo che invece di due astronavi ci siano due raggi di luce che passano sopra di noi in sensi opposti. L'osservatore sulla Terra li vede allontanarsi fra loro con velocità $2c$, ovvero doppia di quella della luce. Ma se egli si trovasse a cavalcare uno di questi raggi, calcolerebbe questa velocità, secondo la formula

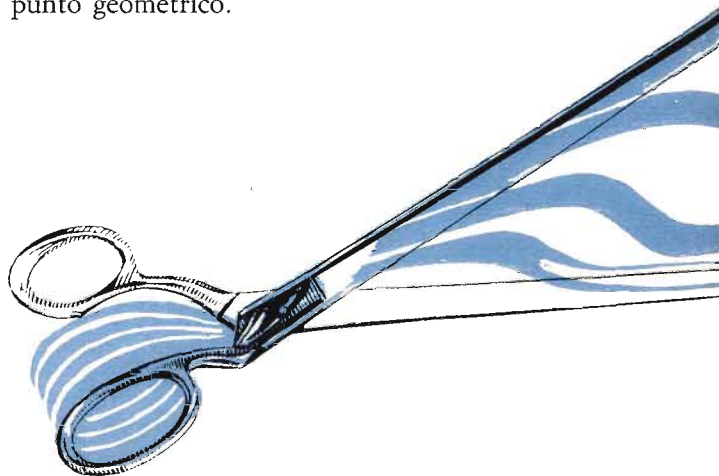
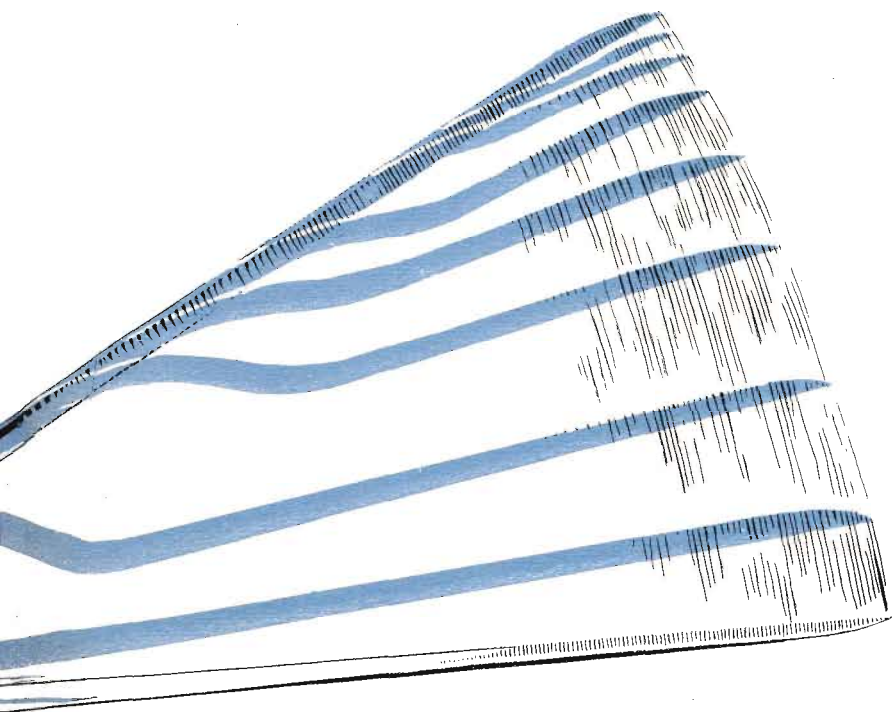
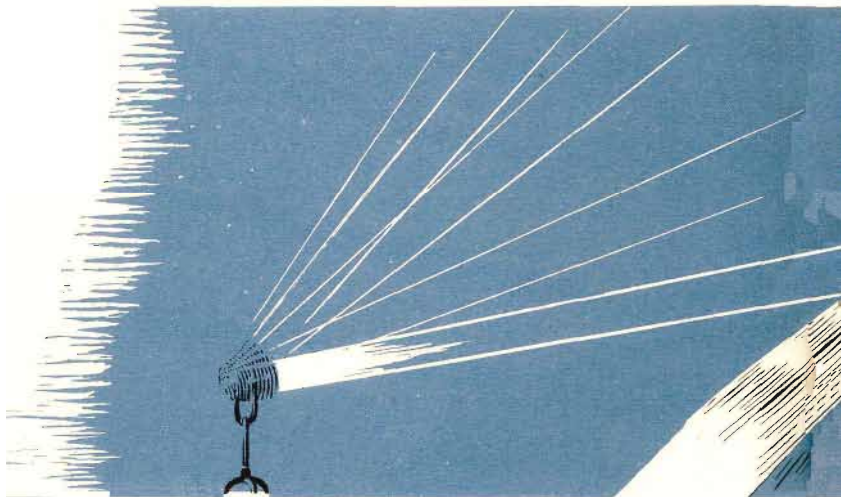
$$\frac{c+c}{1+\frac{c^2}{c^2}}$$

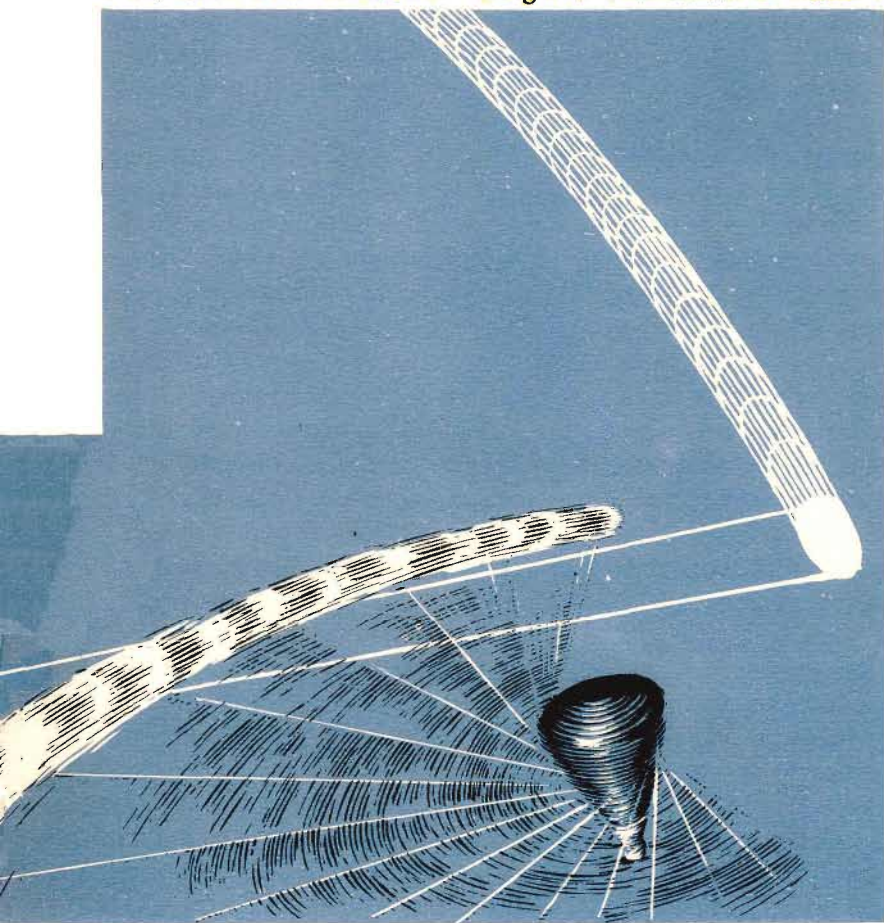
che naturalmente, si riduce al valore c. In altre parole, egli vedrebbe l'altro raggio allontanarsi da lui con la velocità della luce.

Supponiamo che un raggio di luce passi sopra di noi nello stesso istante in cui un'astronave viaggia in senso opposto con una velocità x. Relativamente al sistema inerziale della Terra, nave e luce si incrociano con velocità c più x. Il lettore può usare la formula per calcolare la velocità della luce come è osservata dal sistema inerziale dell'astronave. Risulta di nuovo c.

Fuori del campo di validità della teoria ristretta, che si riferisce solamente ai sistemi inerziali, è ancora possibile parlare della velocità della luce come di un limite assoluto. Ma questo concetto deve venir ora espresso in modo diverso: non c'è modo

di inviare un *segnale* da un corpo materiale ad un altro, con una velocità superiore a quella della luce. « Segnale » ha qui il significato più ampio, tale da includere ogni sorta di catena causa-effetto per mezzo della quale si possa trasmettere un messaggio: l'invio di un oggetto fisico, ad esempio, o la trasmissione di un qualche tipo di energia quale un'onda sonora, un'onda elettromagnetica, un'onda d'urto in un solido, e così via. Non si può inviare un messaggio a Marte con una velocità maggiore di quella della luce. Non si può farlo scrivendo una lettera e mandandola con un razzo, perché, come abbiamo visto, la velocità relativa del razzo deve essere sempre minore della velocità della luce. Se il messaggio è codificato e mandato a mezzo radio o col radar, viaggia *alla* velocità della luce. Nessun'altro tipo di energia può permettere una più rapida trasmissione del messaggio cifrato.

Sebbene non si possano inviare segnali più veloci della luce, è possibile osservare certi tipi di moto che, relativamente all'osservatore, avranno velocità maggiore della luce. Immaginate un gigantesco paio di forbici, con le lame lunghe come di qui a Nettuno. Le forbici cominciano a chiudersi con velocità uniforme. Mentre questo avviene, il punto di intersezione dei due bordi taglienti si sposterà verso la punta delle forbici con velocità sempre crescente. E immaginate di trovarvi seduti sul perno immobile che tiene unite le lame. Relativamente al vostro sistema inerziale, il punto di intersezione delle lame ben presto si starà allontanando da voi con una velocità superiore a quella della luce. Naturalmente, non è un oggetto materiale quello che si muove, ma un punto geometrico.

Forse vi sta balenando questo pensiero. Supponiamo che l'impugnatura delle forbici si trovi sulla Terra e il punto di intersezione delle lame su Nettuno. Se aprite e chiudete leggermente l'impugnatura, il punto di intersezione si sposta avanti e indietro. Non potremmo allora trasmettere dei segnali a Nettuno quasi istantaneamente? No, perché l'impulso che muove le lame deve passare da molecola a molecola, e questa propagazione deve essere più lenta della luce. Non ci sono corpi perfettamente rigidi nella relatività generale. Altrimenti potremmo semplicemente protendere un'asta rigida dalla Terra a Nettuno e inviare messaggi istantaneamente spingendo avanti e indietro un estremo. In nessun modo un gigantesco paio di forbici, o qualsiasi altro tipo di oggetto cosiddetto rigido, potrebbe essere usato per trasmettere un segnale con velocità superiore a quella della luce.

Se il fascio di luce di un riflettore è puntato contro uno schermo grande abbastanza ed abbastanza lontano, questo fascio di luce può esser ruotato in modo che la macchia di luce sullo schermo lo attraversi con velocità maggiore di quella della luce. Ancora una volta non è un oggetto materiale a muoversi; il moto è in realtà un'illusione. Se il riflettore viene puntato nello spazio e fatto ruotare, le lontane parti del raggio spazzeranno lo spazio ad una velocità molto superiore a quella della luce. Il capitolo 5 vi mostrerà che è possibile considerare la Terra come sistema di riferimento non rotante. Considerate da questo punto di vista, le stelle gireranno attorno alla Terra con una velocità tangenziale molto maggiore della velocità della luce. Come ha rilevato un cosmologo, una stella lontana solo 10 anni luce ha una velocità relativa attorno alla Terra di dieci volte la velocità della luce. E non è neppure necessario volgere l'attenzione alle stelle per infrangere geometricamente la barriera della luce. Facendo girare una trottola, un bambino può conferire alla Luna una velocità di rotazione (relativa ad un sistema di coordinate ancorato alla trottola) che è ben superiore ai 300.000 chilometri al secondo.

Il capitolo 10 spiega che, secondo una diffusa teoria sull'universo, forse le lontane galassie si allontanano dalla Terra a velocità più grande di quella della luce. Nessuno di questi esempi contraddice l'affermazione che la velocità della luce costituisce una barriera per l'invio di segnali da un corpo materiale ad un altro.

Un'importante conseguenza della teoria della relatività ristretta, conseguenza a cui possiamo solo brevemente accennare, è che sotto certe condizioni l'energia si trasformerà in massa e

sotto altre condizioni la massa si trasformerà in energia. I fisici pensavano un tempo che la quantità totale di massa nel cosmo fosse costante e che fosse costante la quantità totale di energia. Questo concetto veniva espresso dalla legge di « conservazione della massa » e dalla legge di « conservazione dell'energia ». Adesso le due leggi si sono fuse in una unica legge, quella di « conservazione della massa-energia ».

Quando i motori a razzo accelerano una cosmonave, parte dell'energia va nell'aumento della massa relativistica. Quando viene messa dell'energia in una caffettiera riscaldandola — cioè affrettando il moto d'agitazione delle molecole — la caffettiera pesa in realtà leggermente più di prima. Quando il caffè si raffredda, un po' di massa si perde. Quando si fornisce dell'energia ad un orologio caricandolo, questo in realtà acquista una minima quantità di massa. Quando l'orologio si scarica, perde la massa. Acquisti e perdite di massa di tale tipo sono tanto trascurabili che non verrebbero mai presi in considerazione nei calcoli ordinari di fisica. La trasformazione della massa in energia non è, però, così trascurabile quando esplode una bomba ad idrogeno!

L'esplosione della bomba è l'improvvisa trasformazione in energia di parte della massa del materiale della bomba. L'energia irradiata dal Sole ha un'origine simile. L'enorme forza di gravità del Sole sottopone il gas di idrogeno nel suo interno ad una pressione così grande, ed innalza tanto la temperatura del gas, che l'idrogeno è fuso, o trasformato, in elio. Durante questo processo parte della massa si trasforma in energia. L'equazione che esprime la relazione tra la massa e l'energia, è, come tutti sanno:

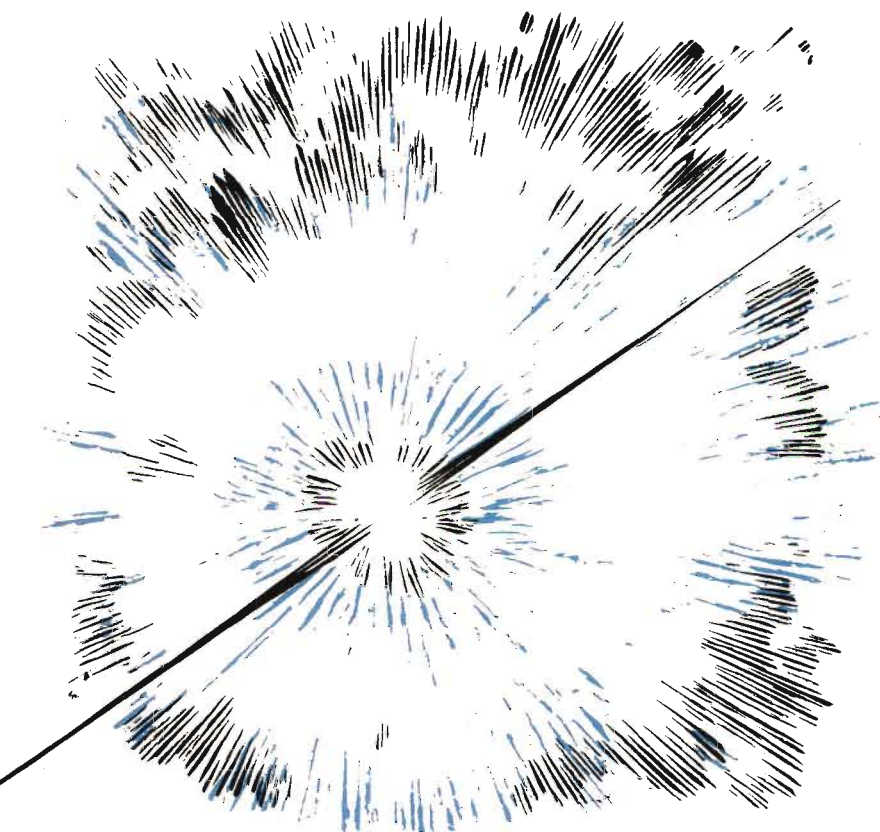
$$e = mc^2,$$

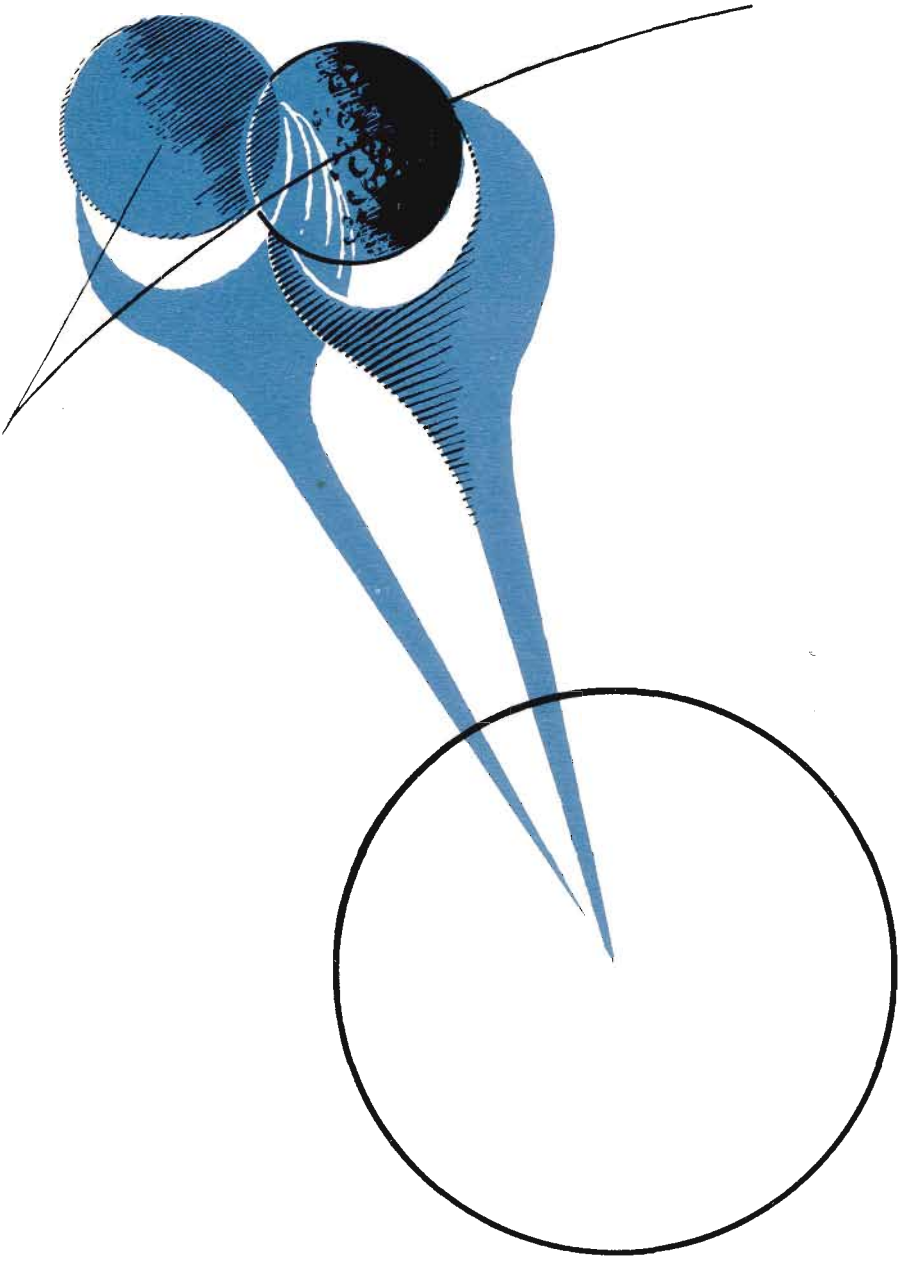
dove e è l'energia, m è la massa, e c^2 è la velocità della luce moltiplicata per se stessa. L'equazione venne formulata da Einstein in relazione alla sua teoria ristretta. È facile vedere dalla formula che una quantità di massa straordinariamente piccola è in grado di liberare una mostruosa quantità di energia. La vita sulla Terra non esisterebbe senza l'energia del Sole; e perciò, in certo senso, la vita dipende da questa formula. Ora si ha l'impressione che anche la fine della vita sulla Terra sia legata a questa for-

mula. Non è esagerato dire che imparare come affrontare il fatto terribile espresso da questa semplice equazione è il problema più grande che mai sia stato messo di fronte all'umanità.

La bomba, tuttavia, è soltanto la più spettacolare delle molte conferme della teoria ristretta. Le verifiche sperimentali cominciarono ad accumularsi non appena l'inchiostro dell'articolo einsteniano del 1905 si era asciugato. Si tratta, infatti, di una delle teorie meglio confermate di tutta la fisica moderna. Ed è confermata ogni giorno nei laboratori degli scienziati atomici che lavorano con particelle dotate di una velocità molto prossima a quella della luce. Più sono veloci tali particelle, maggiore è la

forza necessaria per farle accelerare di una data quantità: maggiore, in altre parole, è la loro massa relativistica. Ecco perché i fisici continuano a costruire macchine sempre più grandi per accelerare le particelle. Sono necessari campi sempre più intensi per vincere la massa sempre crescente delle particelle man mano che queste vengono spinte a velocità sempre più prossime a quella della luce. Attualmente gli elettroni possono venir accelerati fino ad una velocità 0,999999999 volte la velocità della luce. Ciò dà ad ogni elettrone una massa (relativamente al sistema inerziale della Terra) che è circa quarantamila volte la sua massa a riposo!

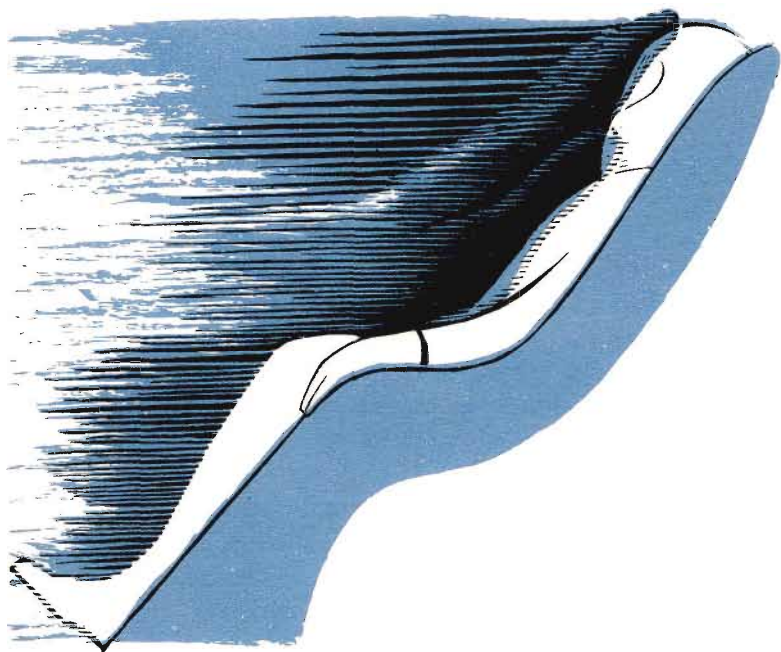
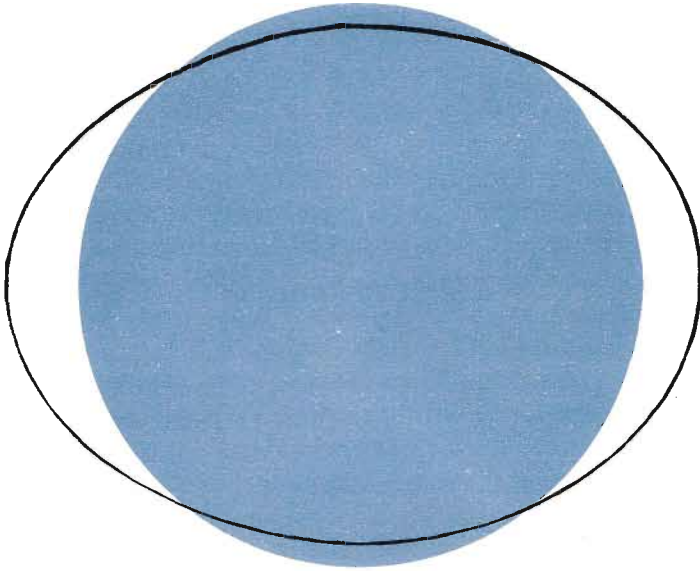
Quando una particella viene a collisione con la sua antiparticella (una particella della stessa struttura ma con carica elettrica opposta), si ha un totale mutuo annientamento. L'intera massa di entrambe le particelle si trasforma in energia radiante. Finora, un risultato del genere si è ottenuto nei laboratori soltanto con alcune particolari particelle di breve vita. Se mai i fisici riuscissero a fabbricare l'antimateria (materia formata di antiparticelle) avrebbero raggiunto l'estremo limite della potenza atomica. Una minima quantità di antimateria su un'astronave, tenuta sospesa a mezzo di campi magnetici, potrebbe combinarsi lentamente con la materia per fornire propulsione sufficiente a portare la nave fino alle stelle.

La teoria della relatività ristretta ha avuto una conferma così totale dall'esperienza che difficilmente si troverebbe oggi un fisico in dubbio sulla solidità essenziale della teoria.

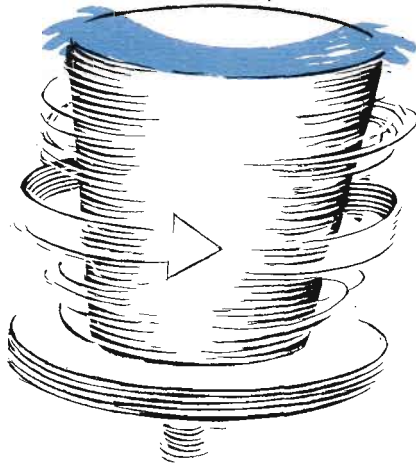
Il moto *uniforme* è relativo. Ma prima di poter dire che *ogni* moto è relativo, c'è un altro ostacolo da superare: l'ostacolo dell'inerzia. Che cosa sia esattamente questo ostacolo e come Einstein l'abbia superato sarà l'argomento del capitolo 5.

La teoria della relatività generale

Al principio del secondo capitolo si è fatto notare che ci sono due metodi per scoprire il moto assoluto: misurare il moto relativamente ad un raggio di luce, e servirsi degli effetti di inerzia che si manifestano quando un corpo viene accelerato. L'esperienza di Michelson-Morley ha mostrato che il primo metodo non serve e la teoria della relatività ristretta di Einstein ha spiegato perché. Questo capitolo si svolge al secondo metodo: l'uso di effetti di inerzia come indizi di un moto assoluto.

Quando viene lanciato un razzo, il cosmonauta che vi si trova dentro è premuto contro lo schienale del proprio sedile da una forza enorme. Questo è un ben noto effetto di inerzia dovuto all'accelerazione del razzo. E sta forse ad indicare che il razzo si

muove? Per arrivare a sostenere che ogni moto è relativo, incluso il moto accelerato, deve essere possibile scegliere il razzo come sistema di riferimento fisso. In tal caso si deve ritenere che siano la Terra e l'intero cosmo a muoversi all'indietro, allontanandosi dal razzo. Ma se guardiamo le cose in questo modo, come possiamo spiegare le forze di inerzia che agiscono sul cosmonauta? La forza con cui egli viene premuto contro il suo sedile sembra indicare, al di là di ogni dubbio, che è il razzo che si muove, e non il cosmo.

Un altro esempio opportuno è fornito dalla Terra in rotazione. La forza centrifuga, un effetto d'inerzia che accompagna la rotazione, fa sì che la Terra si rigonfi leggermente all'equatore. Se tutto il moto è relativo, non ne deriva che possiamo scegliere la Terra come sistema fisso di riferimento, e considerare il cosmo come ruotante intorno ad essa? Certamente, ma quale causa

determina allora il rigonfiamento della Terra all'equatore? Questo rigonfiarsi sembra indicare che è la Terra a ruotare, e non l'universo. Diciamo per inciso che gli astronomi non sono d'accordo se la forza centrifuga continui a conservare il rigonfiamento all'equatore, o se il rigonfiamento si sia prodotto nelle ere geologiche passate, quando la Terra era più plastica, e sia ora divenuto una configurazione della Terra rigida, configurazione che rimarrebbe anche se la Terra smettesse di ruotare. Tutti, però, sono d'accordo che la forza centrifuga è responsabile del rigonfiamento.

Proprio questa linea di pensiero convinse Newton che il moto *non* era relativo. Egli addusse come prova il fatto che se si imprime un movimento di rotazione ad un secchio d'acqua attorno

ad un asse verticale, la forza centrifuga renderà concava la superficie dell'acqua, o addirittura farà traboccare l'acqua dai bordi. Non è concepibile che un universo ruotante possa avere un simile effetto sull'acqua; perciò si deve concludere, secondo Newton, che la rotazione del secchio è assoluta.

Per dieci anni, dopo aver pubblicato la sua teoria ristretta, Einstein meditò su questo problema. La maggior parte dei fisici non lo considerava nemmeno un problema. Perché non affrontare il fatto, essi dicevano, che il moto uniforme è relativo (come afferma la teoria ristretta), ma che il moto accelerato è assoluto? Einstein non era soddisfatto di questo stato di cose; aveva il sospetto che se il moto uniforme è relativo, lo sia anche il moto accelerato. Finalmente, nel 1916, undici anni dopo che aveva visto la luce la sua teoria della relatività ristretta, pubblicò la sua teoria della relatività generale. La teoria è detta generale perché è una generalizzazione o estensione della teoria ristretta. Essa comprende la teoria ristretta come caso particolare.

La teoria generale è una conquista intellettuale molto più importante della teoria ristretta. Se Einstein non fosse stato il primo a concepire la teoria ristretta, non vi è dubbio che altri fisici vi avrebbero ben presto pensato. Poincaré, il matematico francese già menzionato, è uno dei molti che vi arrivarono vicinissimi. In un importante discorso da lui tenuto nel 1904 (il

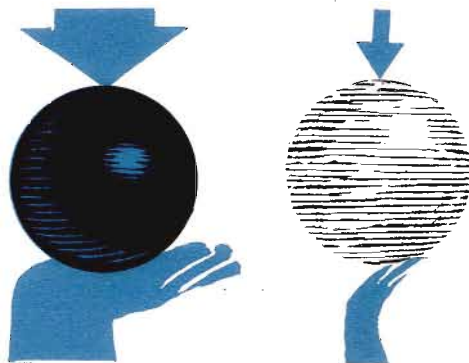
discorso è ristampato nel *Scientific Monthly* dell'aprile 1956), Poincaré predisse che sarebbe sorta una « meccanica completamente nuova » in cui nessuna velocità avrebbe potuto superare quella della luce, proprio come nessuna temperatura può scendere al di sotto dello zero assoluto. Questa nuova meccanica, disse, avrebbe conservato « il principio di relatività, secondo il quale le leggi dei fenomeni fisici sarebbero le stesse sia per un osservatore immobile che per un osservatore trascinato in un moto uniforme di traslazione; talché non sappiamo come discernere se siamo o meno trascinati in un simile moto ». Poincaré non vide i passi essenziali che si dovevano compiere per realizzare questo programma, ma aveva certamente intuito l'essenza della teoria ristretta. A quel tempo Einstein non era consapevole di quanto fosse vicino al suo il pensiero di Poincaré, di Lorentz e di altri. Qualche anno dopo, egli rese a questi uomini generoso omaggio.

La teoria della relatività generale è una questione totalmente diversa. Fu, per usare una volta ancora le parole di Teller, « stupendamente inaspettata »: un'opera di così splendida originalità, secondo linee per nulla ortodosse, che piombò nel mondo scientifico producendovi circa lo stesso effetto che produsse il nuovo tipo di ballo in voga, il twist, quando invase nel 1962 le sale da ballo degli Stati Uniti. Einstein aveva dato un nuovo andamento agli antichi ritmi di danza del tempo e dello spazio. In un lasso di tempo sorprendentemente breve ogni fisico di questo mondo ballava già la nuova danza, o esprimeva il proprio orrore, o rimpiangeva di essere troppo vecchio per impararla. Se Einstein non fosse vissuto, altri fisici senza dubbio avrebbero dato alla fisica lo stesso ritmo, ma avrebbe potuto passare un secolo o più prima che vi arrivassero. Poche altre grandi teorie nella storia della scienza sembrano essere così completamente opera di un singolo.

« Newton, perdonami », scrisse Einstein verso la fine della sua vita. « Tu hai trovato la sola via che, ai tuoi tempi, fosse possibile per un uomo di altissimo intelletto e potenza creativa ». È un omaggio commovente reso dal più grande scienziato dei nostri tempi al suo più grande predecessore.

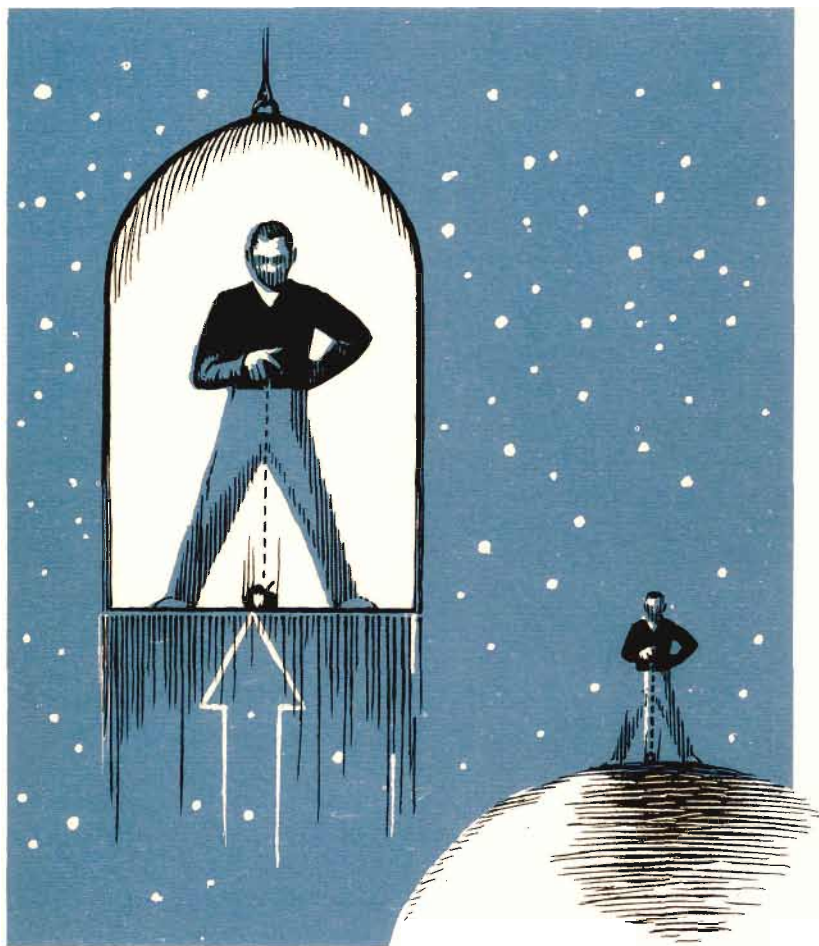
Al centro della teoria generale di Einstein c'è quello che egli chiama il principio di equivalenza. E cioè l'affermazione sconcertante (Newton lo avrebbe considerato pazzo) che la gravità e l'inerzia non sono altro che la stessa cosa. Il che non sta semplicemente a significare che hanno effetti simili. *Gravità ed inerzia sono due parole diverse che indicano esattamente la stessa cosa.*

Einstein non fu il primo degli scienziati ad essere colpito dalla strana rassomiglianza tra gli effetti gravitazionali e d'inerzia. Considerate per un momento soltanto quanto avviene quando una palla da cannone e una pallina di legno vengono lasciate cadere dalla stessa altezza. Supponete che il peso della palla da cannone sia cento volte quello della pallina di legno. Ciò vuol dire che la gravità attrae la palla da cannone con una forza che è cento volte quella esercitata sulla pallina di legno. È facile comprendere perché gli amici di Galileo non potessero credere che due palle siffatte avrebbero raggiunto il suolo nel medesimo istante. Naturalmente noi tutti sappiamo adesso che, prescindendo dall'influenza esercitata dalla resistenza dell'aria, le due palle cadono fianco a fianco. Per spiegare questo fatto, Newton dovette ammettere qualcosa di molto curioso. Mentre la gravità esercita sulla palla da cannone una forza di attrazione, l'inerzia — cioè la *resistenza* alla forza — della palla da cannone la trattiene. È vero, la forza di gravità della palla da cannone è cento volte quella della palla di legno, ma anche l'inerzia che la trattiene è esattamente cento volte più grande!

Spesso i fisici si esprimono in questo modo. La forza di gravità di un corpo è sempre proporzionale alla sua inerzia. Se un

corpo A pesa il doppio del corpo B, anche la sua inerzia è doppia. Per accelerare fino ad una data velocità l'oggetto A ci vorrà una forza doppia di quella necessaria per portare l'oggetto B alla stessa velocità. Se così non fosse, corpi di peso diverso cadrebbero con accelerazioni diverse.

È facile immaginare un mondo in cui le due forze non siano proporzionali. Anzi, questo è proprio il mondo che immaginarono gli scienziati dal tempo di Aristotele al tempo di Galileo! Potremmo andare avanti benissimo in un mondo siffatto. In un ascensore che cade, le condizioni non sarebbero proprio le stesse, ma quante volte si viaggia in un ascensore che cade? Per l'appunto viviamo in un mondo in cui le due forze sono proporzionali. Galileo fu il primo a dimostrarlo. Esperienze straordinariamente accurate che confermano le scoperte di Galileo vennero effettuate nel 1900 da un fisico ungherese, il Barone Roland von Eötvös. La più accurata di tutte le verifiche venne compiuta in questi ultimi anni da un gruppo di scienziati all'Università di Princeton. Per quanto si è potuto rilevare fin qui, la massa gravitazionale (peso) è sempre esattamente proporzionale alla massa inerte.

Newton sapeva, naturalmente, di questo tiro alla fune fra gravità ed inerzia, un tiro alla fune in conseguenza del quale tutti i corpi cadono con la medesima accelerazione, ma non riusciva assolutamente a spiegarlo. Era semplicemente una straordinaria coincidenza. A causa di questa coincidenza è possibile servirsi dell'inerzia in modo da creare o da eliminare dei campi gravitazionali. Nel capitolo 1 abbiamo messo in evidenza come in una astronave a forma di toro (ciambella) si possa produrre un campo gravitazionale facendo semplicemente girare la nave come una ruota. A causa della forza centrifuga gli oggetti dentro l'astronave vengono premuti contro la parete esterna. Facendo ruotare la nave ad una certa velocità costante, si crea un campo di forza d'inerzia che ha lo stesso effetto del campo gravitazionale sulla Terra. I cosmonauti potrebbero andare attorno camminando su quello che considererebbero un pavimento curvo. Gli oggetti, lasciati cadere, cadrebbero su questo pavimento. Il fumo si in-

nalzerebbe verso il soffitto. Tutti gli effetti di un normale campo gravitazionale sarebbero presenti. Einstein illustrò tale fatto con l'esperienza ideale dell'ascensore sollevato nello spazio con una velocità che cresce costantemente. Se questa accelerazione è costante ed uguale a quella con cui un corpo cade sulla Terra, le persone che si trovano nell'ascensore crederebbero di trovarsi in un campo gravitazionale esattamente come sulla Terra.

Non solo l'accelerazione può simulare in questo modo la gravità, ma può anche neutralizzarla. In un ascensore che cade, ad esempio, l'accelerazione verso il basso elimina completamente dentro la cabina l'effetto della gravità. Uno stato di *g* nulla (gravità nulla) prevale dentro una nave spaziale per tutto il tempo in cui questa si trova in stato di caduta libera: si muove cioè liberamente sotto l'influenza della sola forza di gravità. L'assenza di peso esperimentata dai cosmonauti russi e americani nei loro

viaggi attorno alla Terra si spiega con il fatto che le loro navi erano in stato di caduta libera mentre giravano intorno alla Terra. Fintantoché i motori a razzo di una nave spaziale non lavorano, dentro la nave c'è *g* uguale a zero.

Questa notevole corrispondenza tra inerzia e gravità rimase inesplicata fino a che Einstein non sviluppò la sua teoria della relatività generale. Anche qui, come nella sua teoria ristretta, egli fece appello alle ipotesi più semplici e più ardite. Ricorderete la tesi di Einstein, nella teoria ristretta, sul motivo per cui sembra non esserci vento d'etere: il motivo è che *non c'è* il vento d'etere. Nella relatività generale Einstein dice: il motivo per cui gravità ed inerzia sembrano la stessa cosa è che *sono* la stessa cosa.

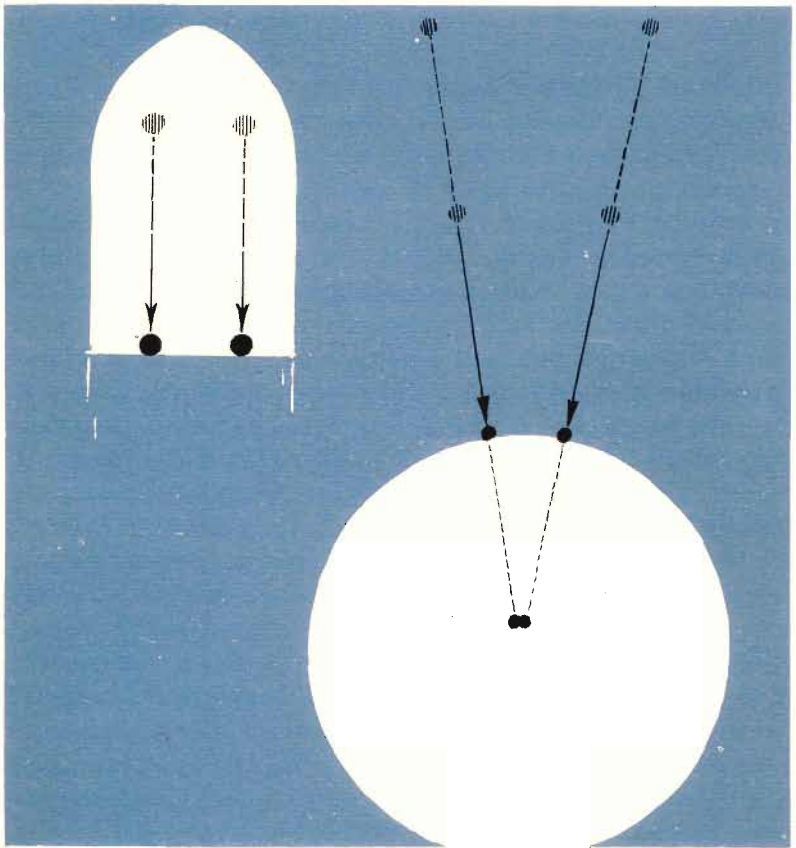
Non è esatto dire che in un ascensore, in stato di caduta libera, la gravità della Terra viene neutralizzata. La gravità non è neutralizzata, è eliminata. In realtà la gravità scompare. Analogamente, non è esatto dire che in una cosmonave ruotante o in un ascensore che accelera verso l'alto la gravità è simulata. In questo caso la gravità non è simulata, ma creata. Un campo gravitazionale prodotto così non ha la stessa struttura matematica del campo gravitazionale che circonda una grande massa di materia come la Terra, ma è tuttavia un autentico campo gravitazionale. Come nella teoria antecedente, la descrizione matematica della natura deve essere complicata perché queste sorprendenti affermazioni possano reggersi, ma i risultati finali giustificano la complicazione. Invece di due forze distinte ce n'è una sola. Inoltre, la teoria porta a dei risultati verificabili con l'osservazione e l'esperienza.

Il principio di equivalenza di Einstein — l'equivalenza della gravità e dell'inerzia — autorizza la concezione che ogni moto, compreso il moto accelerato, è relativo. E il gioco è fatto. Quando l'ascensore di Einstein è visto alzarsi in moto accelerato attraverso il cosmo, dentro l'ascensore si osservano effetti d'inerzia. Ma in teoria possiamo considerare l'ascensore come sistema di riferimento immobile fissato. Allora è l'intero universo, con tutte le sue galassie, a muoversi in giù rispetto all'ascensore con moto

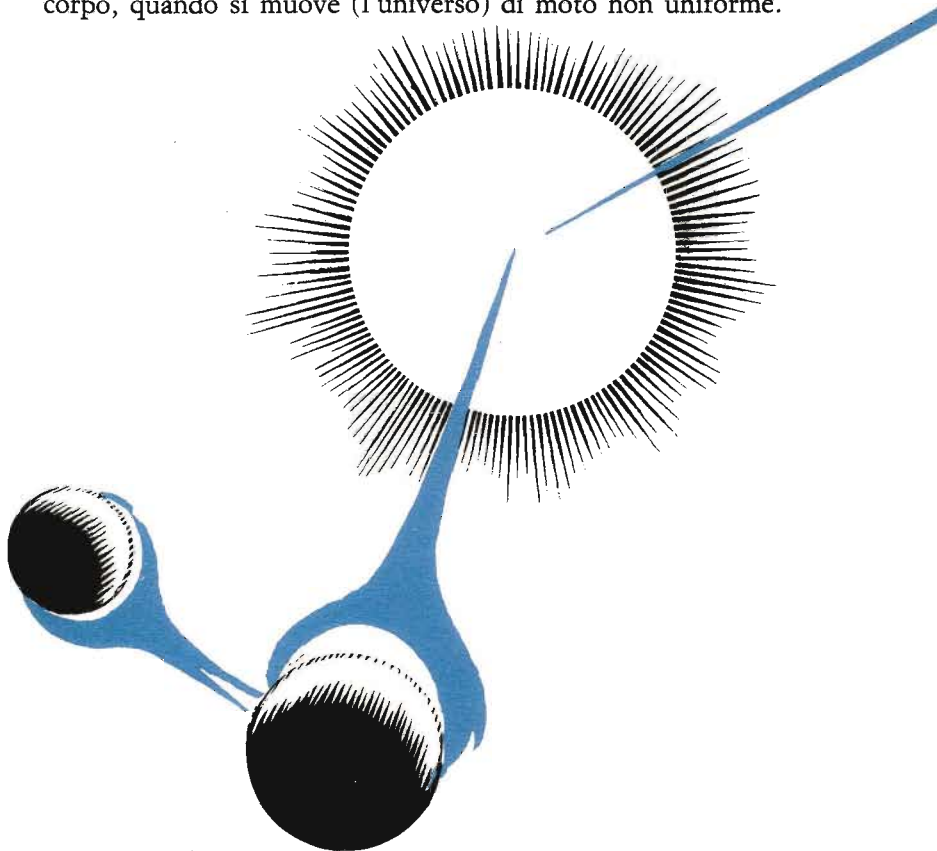
accelerato. *Questo moto accelerato dell'universo genera un campo gravitazionale*. Il campo fa sì che gli oggetti dentro l'ascensore premano contro il pavimento. Si può dire che questi effetti sono gravitazionali, non d'inerzia.

Ma che cosa sta *veramente accadendo*? È l'ascensore che si muove provocando degli effetti d'inerzia o è l'universo che si muove causando degli effetti gravitazionali? Questa non è una domanda ben posta. Non c'è un moto *vero*, assoluto; c'è solo un moto relativo tra l'ascensore e l'universo. Questo moto relativo crea un campo di forza, descritto dalle equazioni di campo della teoria generale. Il campo può essere chiamato tanto gravitazionale quanto d'inerzia, a seconda della scelta del sistema di riferimento. Se il sistema di riferimento è l'ascensore, il campo si chiama gravitazionale; se il sistema di riferimento è il cosmo, il campo si chiama d'inerzia. Inerzia e gravità non sono che due parole diverse applicabili alla medesima situazione. Naturalmente, è molto più semplice e conveniente considerare fisso l'universo. Nessuno sarebbe portato a denominare il campo gravitazionale: tuttavia la teoria della relatività generale dice che il campo *può* essere detto gravitazionale se viene adottato un conveniente sistema di riferimento. E all'interno di un simile ascensore non si è in grado di eseguire alcun esperimento capace di provare che questa scelta è « errata ».

Quando si afferma che l'osservatore dentro l'ascensore non può dire se il campo che lo preme contro il pavimento è un campo d'inerzia oppure un campo gravitazionale, *non* si intende dire che egli non può distinguere la differenza tra il suo campo e un campo gravitazionale del tipo di quelli che circondano una grande massa di materia, come un pianeta. Il campo gravitazionale che circonda la Terra, ad esempio, ha una struttura sferica che non può essere riprodotta facendo accelerare un ascensore nello spazio. Se due mele sono tenute a mezzo metro di distanza e poi lasciate andare da grande altezza sopra la Terra, esse si av-

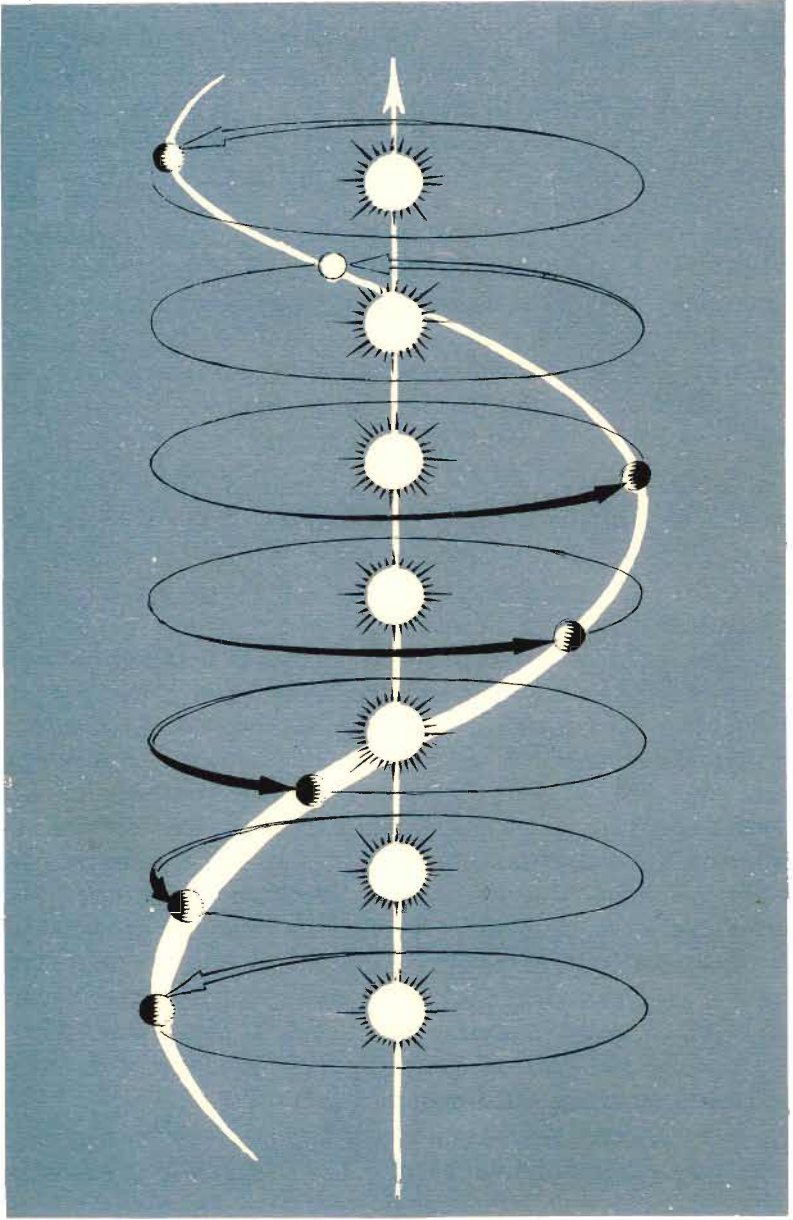
vicineranno durante la caduta, perché ogni mela cade secondo una linea retta passante per il centro della Terra. Nell'ascensore in moto, invece, tutti gli oggetti cadono secondo rette parallele. Questa differenza tra i due campi potrebbe essere rivelata da esperimenti eseguiti nell'ascensore, ma gli esperimenti non farebbero distinzione fra inerzia e gravità; farebbero distinzione solo fra campi di diversa struttura matematica.

Una situazione di questo tipo ci viene presentata dalla Terra in rotazione. L'antica discussione se sia la Terra a ruotare attorno all'universo o viceversa (come insegnava Aristotele) non è null'altro che una discussione sulla scelta più semplice di un sistema di riferimento. La scelta più conveniente è, ovviamente, l'universo. Relativamente all'universo, diciamo che la Terra ruota e che l'inerzia provoca il rigonfiamento dell'equatore. Unicamente la scomodità ci impedisce di scegliere la Terra come sistema fisso di riferimento. In quest'ultimo caso diciamo che il cosmo ruota attorno alla Terra, generando un campo gravitazionale che agisce sull'equatore. Una volta ancora, questo campo non ha la stessa struttura matematica del campo gravitazionale circondante un pianeta, ma ha diritto di esser definito un vero campo gravitazionale. Se adottiamo la Terra come sistema fisso di riferimento, non facciamo nemmeno violenza al nostro parlare quotidiano. Noi diciamo che il Sole si alza la mattina e si corica la sera: che l'Orsa Maggiore ruota attorno alla Stella Polare. Quale punto di

vista è « giusto »? Ruotano i cieli o la Terra? La domanda è priva di significato. Nello stesso modo una cameriera potrebbe domandare al cliente se vuole il gelato sulla fetta di torta o una fetta di torta sotto il gelato.

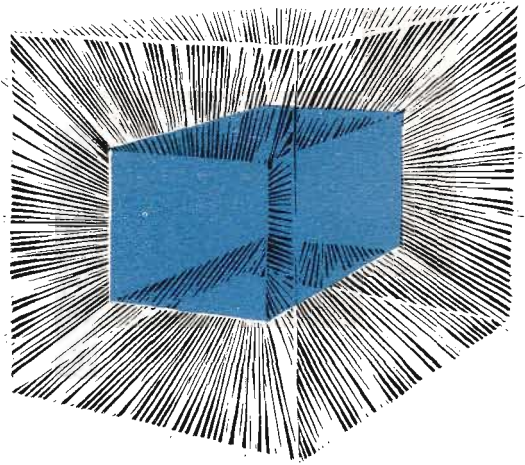
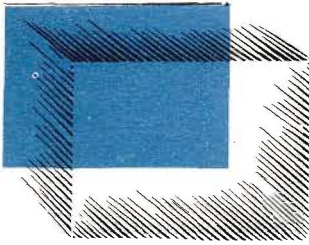
Pensiamo che il cosmo eserciti una specie di « presa » misteriosa su ogni corpo che vi si trova (nel capitolo 7 tratteremo il problema dell'origine di questa presa). Lo strano di questa presa è che quando un corpo si muove uniformemente attraverso l'universo, l'universo non oppone resistenza al moto. Appena si compie un tentativo di imporre al corpo un moto non uniforme (accelerato), la presa si stringe. Se si considera l'universo come sistema fisso di riferimento, la presa è detta l'inerzia del corpo: la sua resistenza al cambiamento di moto. Se invece consideriamo il corpo come sistema di riferimento fisso, la presa si dice gravitazionale: il tentativo dell'universo di trascinare con sé il corpo, quando si muove (l'universo) di moto non uniforme.

La teoria della relatività generale viene spesso riassunta come segue. Newton ha messo in chiaro che, se un osservatore si trova in moto uniforme, non può eseguire alcun esperimento meccanico che dimostri il suo stato di moto o di quiete. La teoria della relatività ristretta ha esteso questa affermazione fino ad includere *tutti* gli esperimenti, ottici e meccanici. La teoria gene-

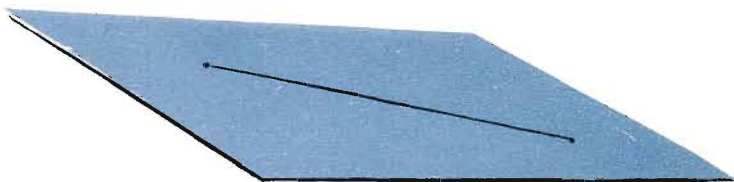
rale è un'ulteriore estensione: una estensione della teoria ristretta che comprende i moti non uniformi. Non c'è alcun tipo di esperimento, dice la teoria generale, con cui un osservatore che si trovi in un *qualsiasi* tipo di moto, uniforme o vario, possa dimostrare il suo stato di moto o di quiete.

Talvolta la teoria generale viene enunziata in questi termini. Tutte le leggi della natura sono degli invarianti (rimangono le stesse) rispetto a qualsiasi osservatore. Ciò significa che, indipendentemente dal moto in cui si trova, un osservatore può descrivere tutte le leggi della natura (come egli le vede) con le medesime equazioni matematiche. Può trattarsi di uno scienziato al lavoro in un laboratorio sulla Terra, o sulla Luna, o dentro una gigantesca cosmonave che accelera lentamente sulla sua rotta verso una stella lontana. La teoria della relatività generale gli fornisce un gruppo di equazioni con cui è in grado di descrivere tutte le leggi naturali implicate in qualsiasi esperimento egli compia. Queste equazioni saranno esattamente le stesse indipendentemente dal suo stato di quiete, di moto uniforme o di moto accelerato relativamente a qualsiasi altro corpo.

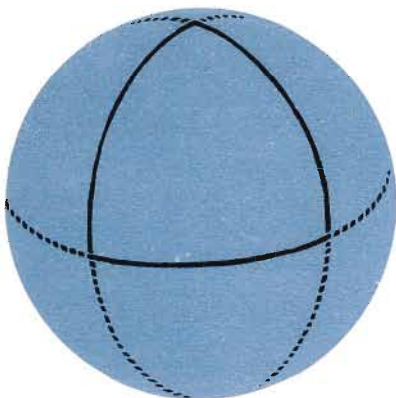
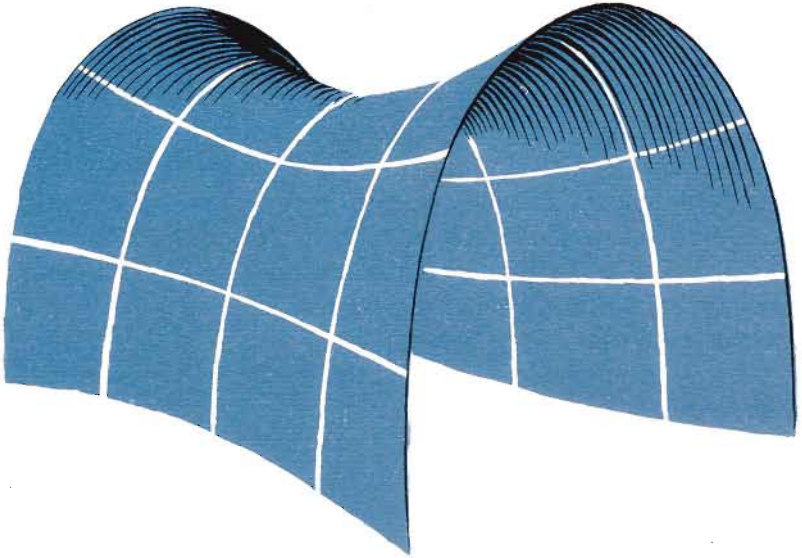
Nel prossimo capitolo esamineremo più a fondo la teoria einsteiniana della gravitazione, e in che modo si colleghi ad un nuovo importante concetto, noto come lo spazio-tempo.

La gravità e lo spazio-tempo

Prima di parlare della teoria della gravità di Einstein, è necessario premettere qualche brevissima osservazione sulla quarta dimensione e sulla geometria non-euclidea. Hermann Minkowski, un matematico polacco, diede un'elegante interpretazione della teoria della relatività. Molte delle idee di questo capitolo appartengono tanto a Minkowski quanto ad Einstein.

Considerate un punto geometrico. Non ha dimensioni. Se si muove in linea retta, genera una linea che ha una dimensione. Muovete la linea retta secondo una direzione ad essa perpendicolare, ed essa genera un piano a due dimensioni. Muovete il piano lungo una direzione ad esso perpendicolare ed esso genera uno spazio a tre dimensioni. Fin qui la nostra immaginazione ci

consente di spingerci. Ma un matematico può concepire (non nel senso di figurarselo nella sua mente, ma nel senso di calcolarne la matematica) di muovere lo spazio tridimensionale secondo una direzione ad angolo retto con tutte e tre le sue dimensioni. Questo genera uno spazio euclideo a quattro dimensioni. Non c'è bisogno di fermarsi a quattro. Possiamo proseguire fino a spazi a cinque, sei, sette, o più dimensioni. Tutti questi spazi sono euclidei. Essi sono estensioni della geometria euclidea nello stesso modo in cui la geometria euclidea solida è un'estensione della geometria euclidea piana.

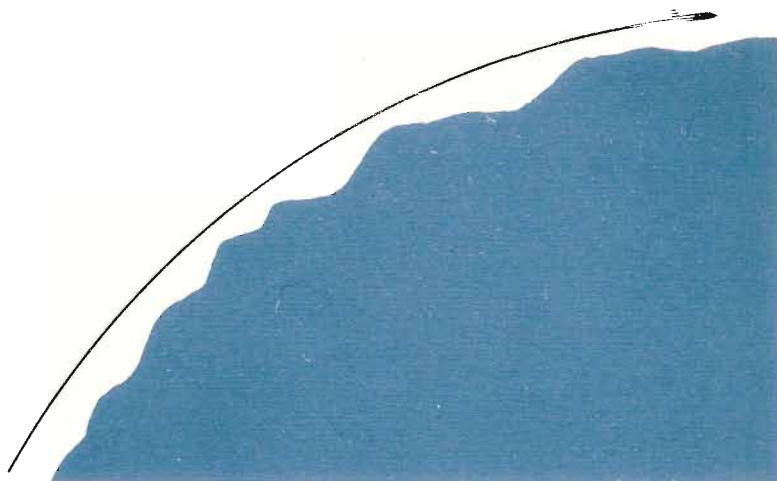
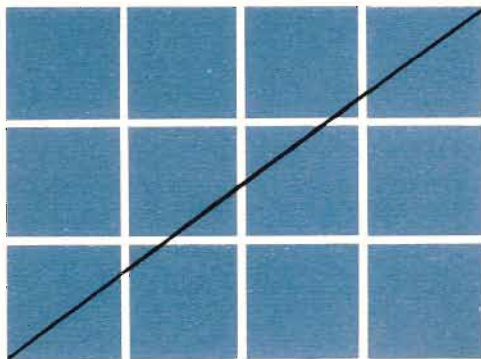
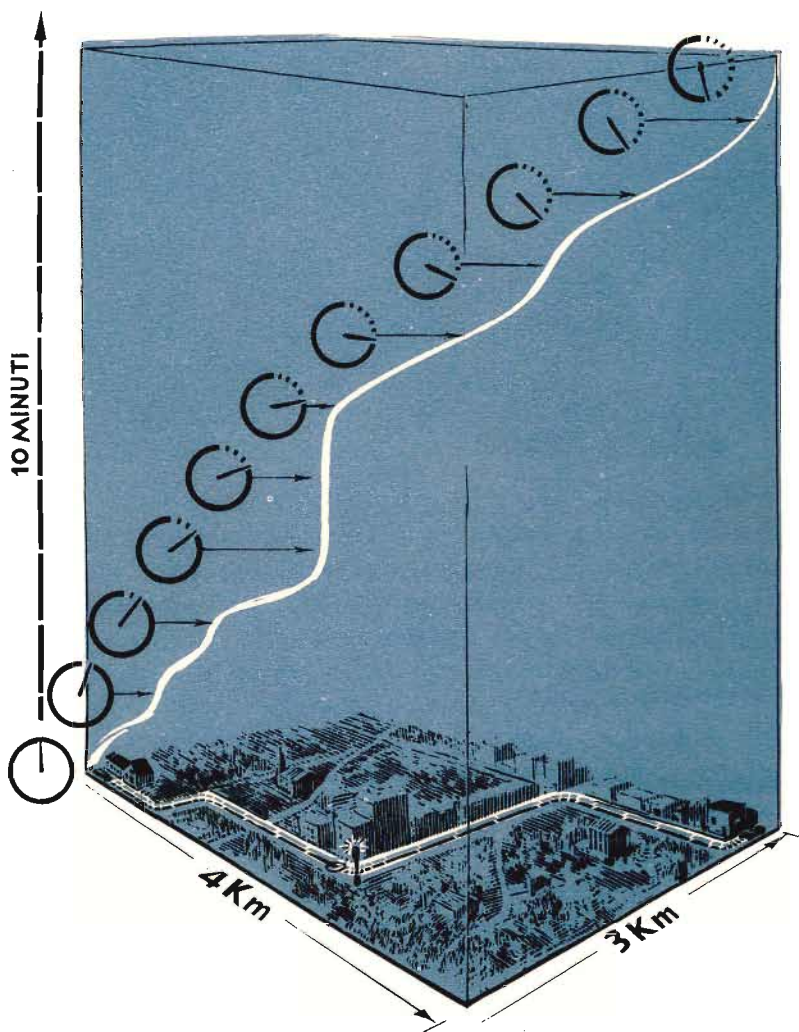
La geometria euclidea è basata su una serie di postulati, uno dei quali è il ben noto postulato delle parallele. Esso dice che in un piano per un punto dato fuori di una retta è possibile condurre una ed una sola parallela alla retta data. Un piano euclideo a cui

si applichi questo postulato, è detto piatto. Esso ha curvatura zero, area infinita. Una geometria non-euclidea è una geometria in cui il postulato delle parallele è sostituito da un altro postulato. Questa sostituzione può avvenire con due postulati sostanzialmente diversi.

Uno dice — è la geometria chiamata ellittica — che sul piano, per un punto fuori di una retta non si può condurre *nessuna* parallela alla retta data. La superficie di una sfera fornisce in modo grossolano ed approssimativo un modello di piano non-euclideo di questo tipo. La linea « più retta » possibile è, sulla sfera, una circolo massimo (un circolo con un diametro uguale a quello della sfera). Tutti i circoli massimi si intersecano l'un l'altro, e così è impossibile per due circoli massimi essere paralleli. Un piano non-euclideo di questo tipo si dice a curvatura positiva. Una siffatta curvatura fa incurvare il piano su se stesso. Il piano ha area finita anziché infinita.

L'altro tipo di geometria non-euclidea, chiamata geometria iperbolica, è una geometria in cui il postulato delle parallele è sostituito da un postulato secondo cui in un piano per un punto fuori di una retta passano infinite rette parallele alla retta data.

Un modello approssimativo di una parte di piano di questo tipo è fornito da una superficie a forma di sella. Non si richiude su se stessa e, come il piano euclideo, si estende all'infinito in tutte le direzioni.

Sia la geometria ellittica che l'iperbolica sono geometrie non-euclidee a curvatura costante. Ciò significa che la curvatura è ovunque la stessa; le figure non subiscono distorsioni spostandosi da una posizione all'altra. Un tipo più generale di geometria non-euclidea, chiamata di solito *geometria generale di Riemann*, permette invece alla curvatura di variare da punto a punto con una qualsiasi legge assegnata.

Così come ci sono geometrie euclidee a 2, 3, 4, 5, 6, 7, ..., dimensioni, ci sono anche geometrie non-euclidee a 2, 3, 4, 5, 6, 7, ..., dimensioni.

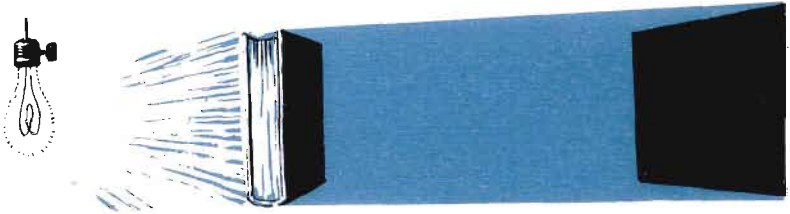
Per sviluppare la teoria della relatività generale, Einstein trovò necessario adottare una geometria generale riemanniana a quattro dimensioni. Non c'è nulla di misterioso o di occulto in tale concetto. Significa semplicemente che ogni evento che ha luogo nell'universo è un evento verificantesi in un mondo quadrimensionale di spazio-tempo.

Si può chiarire questo punto con la considerazione dell'evento seguente. Salite in automobile alle 2 pomeridiane e guidate da casa vostra fino ad una trattoria che si trova 3 chilometri a sud e 4 chilometri ad est della vostra casa. Sul piano a due dimensioni la distanza effettiva fra casa vostra e la trattoria è l'ipotenusa di un triangolo rettangolo che ha i cateti di 3 e di 4 chilometri. L'ipotenusa in questione è lunga 5 chilometri. Ma avete impiegato anche un certo intervallo di tempo, diciamo 10 minuti, per compiere il tragitto. Questo lasso di tempo si può rappresentare in un grafico tridimensionale. Una coordinata del grafico rappresenta la distanza verso sud misurata in chilometri,

un'altra la distanza verso est in chilometri, la coordinata verticale rappresenta il tempo misurato in minuti. Su questo grafico tridimensionale di spazio-tempo, l'« intervallo » (la distanza nello spazio-tempo) tra i due eventi (partenza da casa vostra e arrivo alla trattoria) è rappresentato da un segmento rettilineo.

Questo segmento rettilineo non è il grafico del tragitto vero e proprio. È semplicemente una misura della distanza spazio-temporale tra due eventi. Un grafico del percorso effettivo sarebbe una linea curva complicata. Complicata perché la vostra macchina accelera alla partenza; la disposizione delle strade quasi certamente vi impedisce di raggiungere in linea retta la trattoria; forse per via vi sarete dovuti fermare ad un semaforo, e infine la vostra macchina ha dovuto accelerare negativamente quando si è fermata. Il complicato grafico ondulato del percorso effettivo si chiama, nella teoria della relatività, la « linea evolutiva » (o « linea d'universo » o anche « linea oraria ») del percorso. In questo caso è una linea evolutiva in uno spazio-tempo a tre dimensioni, o, come viene chiamato talvolta, un trispazio di Minkowski.

Poiché il percorso in automobile è avvenuto su un piano a due dimensioni, è stato possibile aggiungere la dimensione del tempo e rappresentare il percorso mediante un grafico tridimensionale. Quando gli eventi avvengono in uno spazio a tre dimensioni del nostro spazio, la quarta coordinata è il nostro tempo. tempo quadridimensionale, ma i matematici riescono ad adoperare tali grafici senza disegnarli materialmente. Provate ad immaginarvi un superscienziato quadridimensionale che possa costruire dei grafici quadridimensionali con la stessa facilità con cui uno scienziato comune può costruire grafici a due o a tre dimensioni. Tre delle coordinate del suo grafico sono le tre dimensioni del nostro spazio, la quarta coordinata è il nostro tempo. Se una nave interplanetaria parte dalla Terra e arriva su Marte, il nostro immaginario superscienziato traccerà la linea evolutiva di questo viaggio come una curva nel suo grafico quadridimensionale. (La linea è curva perché la nave non può compiere un viaggio simile senza accelerare). L'intervallo spazio-temporale tra il lancio e l'atterraggio apparirà come un segmento rettilineo sul grafico.

Nella teoria della relatività, ogni corpo è una struttura quadridimensionale che procede lungo una linea evolutiva nell'universo quadridimensionale dello spazio-tempo. Se un corpo è con-

siderato in quiete rispetto alle tre coordinate dello spazio, esso si sposta ciononostante attraverso la dimensione del tempo. Nel grafico la sua linea evolutiva sarà una retta parallela all'asse del tempo. Se il corpo si muove attraverso lo spazio con moto uniforme, la sua linea evolutiva sarà ancora una retta, ma non più parallela all'asse del tempo. Se il corpo si muove di moto non uniforme, la sua linea evolutiva diviene curva.

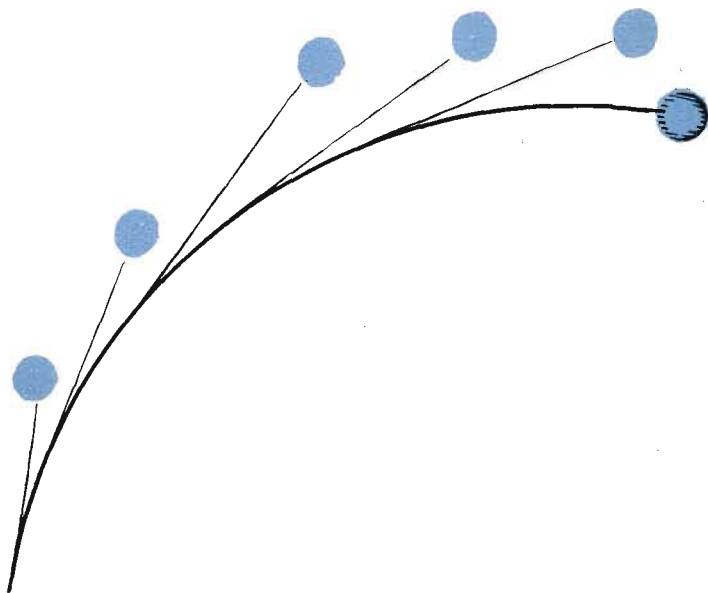
Ci troviamo così in una posizione tale da poter riguardare la contrazione di Lorentz-FitzGerald della teoria ristretta da un nuovo punto di vista: il punto di vista di Minkowski, o il punto di vista del nostro superscienziato. Come abbiamo già messo in rilievo, quando le due astronavi si incrociano nel loro moto relativo, gli osservatori di ciascuna nave scorgono alcuni cambiamenti nella forma e nel ritmo del tempo dell'altra. Questo perché spazio e tempo non sono degli assoluti che esistono indipendentemente l'uno dall'altro. Sono, se mi è lecita l'espressione, le ombre di un corpo dello spazio-tempo quadridimensionale. Se si pone un libro davanti ad una sorgente di luce e se ne proietta l'ombra su uno schermo a due dimensioni, una rotazione del libro farà alterare la forma della sua ombra: con il libro in una posizione, l'ombra sarà un rettangolo spesso;

con il libro in un'altra posizione, l'ombra è un rettangolo sottile.

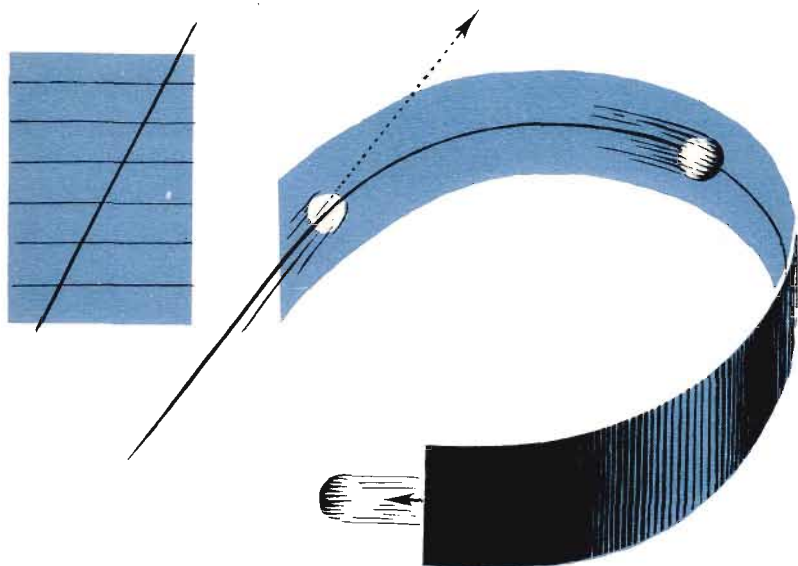
La forma del libro non cambia; solo la sua proiezione bidimensionale cambia. Parimenti, un osservatore vede una struttura quadridimensionale, ad esempio un'astronave, in posizioni tridimensionali diverse a seconda del moto relativo della struttura. In qualche caso la proiezione mostra più di spazio e meno di tempo; in altri casi succede il contrario. I cambiamenti che l'osservatore nota nelle dimensioni dello spazio e del tempo dell'altra astronave si possono spiegare mediante una specie di « rotazione » della nave nello spazio-tempo, che ne altera l'ombra proiettata sullo spazio e sul tempo. Ecco quanto aveva in mente Minkowski all'inizio di una sua famosa conferenza all'80ª Assemblea dei Naturalisti Tedeschi (nel 1908). La conferenza è ristampata nel volume *Il principio di Relatività* di Albert Einstein ed altri. Nessun libro divulgativo sulla relatività è completo senza questa citazione:

« Le visioni di spazio e tempo che desidero presentarvi sono scaturite dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò sta la loro forza. Sono radicali. Per cui lo spazio preso isolatamente e il tempo preso isolatamente sono destinati a dissolversi in semplici ombre, e solo una specie di unione dei due conserverà una realtà indipendente ».

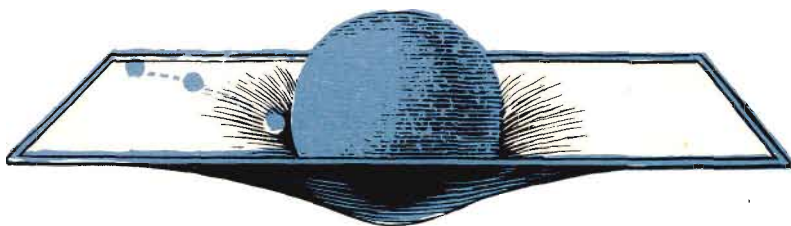
Il punto essenziale da cogliere è che la struttura spazio-temporale, la struttura quadridimensionale, della nave spaziale è altrettanto rigida ed immutevole che nella fisica classica. Questa è la differenza essenziale fra l'abbandonata teoria della contrazione di Lorentz e la teoria della contrazione di Einstein. Per Lorentz la contrazione era una contrazione effettiva di un corpo tridimensionale. Per Einstein il corpo « reale » è un corpo quadridimensionale che non muta affatto. È visto semplicemente, per così dire, sotto angoli differenti. La sua proiezione tridimensionale nello spazio e la sua proiezione unidimensionale nel tempo possono variare, ma l'astronave quadridimensionale dello spazio-tempo rimane rigida.

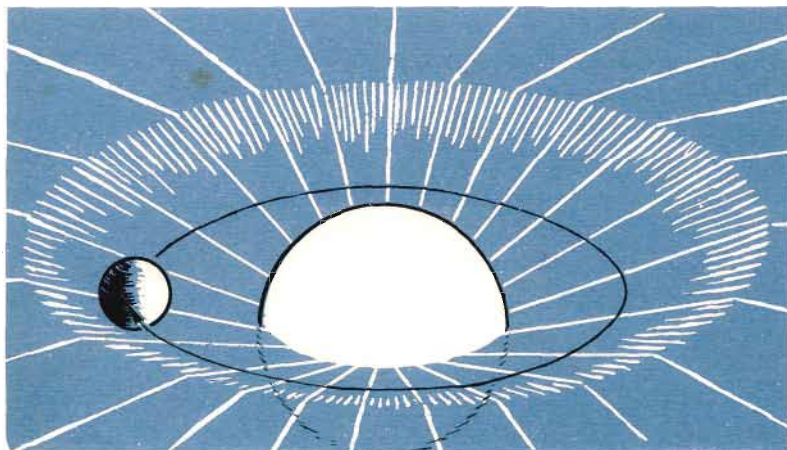
Ecco un altro esempio di come la teoria della relatività introduca dei nuovi assoluti. La forma quadridimensionale di un corpo rigido è una forma assoluta immutevole. Parimenti l'inter-

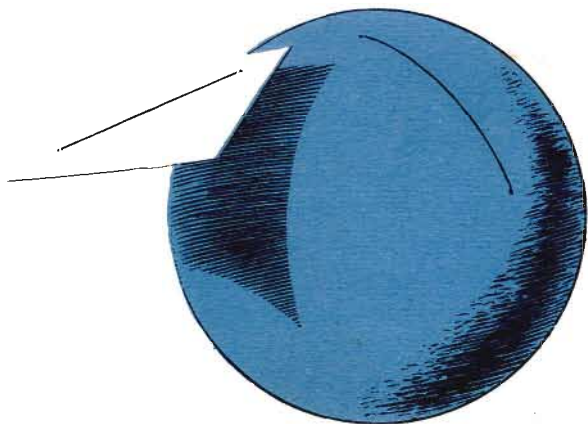
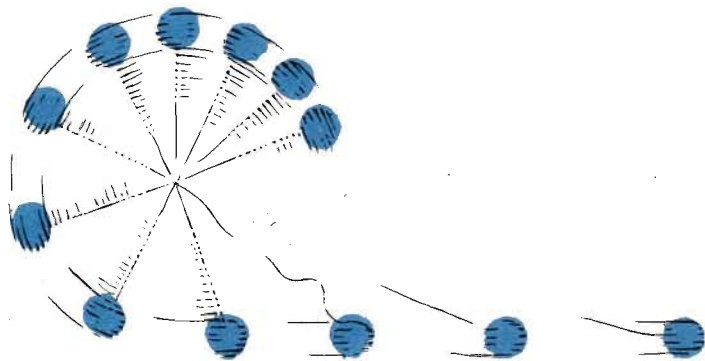
vallo quadridimensionale tra due qualsiasi eventi dello spazio-tempo è un intervallo assoluto. Osservatori in rapidissimo moto o con moti relativi differenti possono non trovarsi d'accordo su quanto siano distanti a loro giudizio due elementi nello spazio, o due eventi nel tempo, ma *tutti* gli osservatori, indipendentemente dal loro moto, si troveranno d'accordo nel giudicare la distanza fra due eventi nello spazio-tempo.

Nella fisica classica un corpo si muove nello spazio in linea retta, a velocità uniforme, se non è soggetto ad alcuna forza. Un pianeta, ad esempio, si allontanerebbe in linea retta se non fosse trattenuto dalla forza di gravità del Sole. Considerato da questo punto di vista, il Sole « attira » il pianeta in un'orbita ellittica.

Anche nella fisica relativistica, un corpo si muove in linea retta, e a velocità costante, se non è soggetto a una forza, ma la linea retta deve essere pensata come una linea nello spazio-tempo invece che nello spazio. Questo è vero anche in presenza della gravità. Per il semplice motivo che la gravità, secondo Einstein,

non è affatto una forza! Il Sole non « attira » i pianeti. La Terra non « attira » giù la mela che cade. Quel che avviene è che un grande massa, come il Sole, fa incurvare lo spazio-tempo nella zona circostante. Più vicino al Sole, la curvatura è maggiore. In altre parole, la struttura dello spazio-tempo in vicinanza di grandi masse materiali diventa non-euclidea. In questo spazio non-euclideo, i corpi continuano a seguire cammini più rettilinei possibile, ma quel che è rettilineo nello spazio-tempo, appare curvo quando viene proiettato nello spazio. Il nostro superscienziato immaginario, se traccia l'orbita della Terra nel suo grafico quadridimensionale, la traccerà come una linea retta. Noi che siamo creature tridimensionali (o più precisamente, che siamo creature che scindono lo spazio-tempo in uno spazio tridimensionale ed in un tempo unidimensionale) vediamo la traiettoria nello spazio come un'ellisse.

Coloro che scrivono sulla relatività spesso spiegano questo fatto nel modo seguente. Immaginate un foglio di gomma teso come un trampolino americano. Se ci mettiamo sopra un pom-

7.

pelmo, questo vi formerà una depressione. Una biglia posta vicino al pompelmo ruzzolerà verso di esso. Il pompelmo non « attira » la biglia. Piuttosto ha creato un campo (la depressione) di struttura tale che la biglia, prendendo la via di minima resistenza, rotola verso il pompelmo. Così, in modo approssimativo (molto approssimativo), lo spazio-tempo è curvato o deformato dalla presenza di grandi masse come il Sole. Questa deformazione è il campo gravitazionale. Un pianeta in moto attorno al Sole non si muove in un'ellisse perché il Sole lo attira, ma perché il campo è tale che l'ellisse è il cammino più rettilineo che il pianeta può percorrere nello spazio-tempo.

Questo cammino si chiama *geodetica*. Il termine è così importante nella teoria della relatività che è bene darne una spiegazione più completa. Su un piano euclideo, come ad esempio un foglio di carta, il cammino più diretto fra due punti è la linea

retta. Ed è anche la distanza più breve. Su una superficie sferica, la geodetica fra due punti è un arco di circolo massimo. Se si tira un filo, più teso che sia possibile, da un punto all'altro, esso segnerà la geodetica. Questa è la distanza più diretta e più breve che collega i due punti.

Anche in una geometria *euclidea* quadridimensionele, dove tutte le dimensioni sono dimensioni spaziali, la geodetica è la linea più breve e più diretta fra due punti. Ma nell'einsteiniana geometria *non-euclidea* dello spazio-tempo, la cosa non è così semplice. Vi sono tre dimensioni spaziali ed una temporale, legate nel modo specificato dalle equazioni della relatività. Questa struttura è tale che una geodetica, sebbene sia ancora la via più diretta possibile nello spazio-tempo, è *la più lunga* anziché la più breve distanza. È impossibile spiegare questo concetto senza addentrarsi in complicazioni matematiche, che portano però al seguente curioso risultato: un corpo che si muove sotto l'azione della sola gravità, segue sempre il cammino lungo il quale impiega il tempo più lungo, quando il tempo è misurato con il suo stesso orologio. Bertrand Russell ha chiamato questo principio la « legge della pigrizia cosmica ». La mela cade giù in linea retta, il missile descrive una parabola, la Terra si muove secondo un'ellisse, perché essi sono troppo pigri per prendere altre vie.

È questa legge di pigrizia cosmica che costringe i corpi a muoversi nello spazio-tempo in modi attribuiti ora all'inerzia ora alla gravità. Se legate una cordicella ad una mela e la fate girare in tondo, la cordicella impedisce alla mela di muoversi in linea retta. Noi diciamo che l'inerzia della mela tende la cordicella. Se quest'ultima si spezza, la mela fugge in linea retta. Qualcosa di simile avviene quando una mela cade da un albero. Prima che cada, il ramo le impedisce di muoversi secondo una linea retta quadridimensionale. La mela sul ramo è in quiete (relativamente alla Terra), ma procede rapidamente attraverso al tempo perché invecchia continuamente. In assenza di un campo gravitazionale, questo viaggio lungo la coordinata del tempo sarebbe rappresentato graficamente da una retta in un diagramma quadridimensionale. Ma la gravità della Terra curva lo spazio-tempo nei dintorni della mela; il che costringe la linea evolutiva della mela a diventare una curva. Quando la mela si stacca dal ramo, continua a muoversi attraverso lo spazio-tempo, ma (essendo una mela pigra) raddrizza ora la sua strada e prende una geodetica. Noi vediamo questa geodetica, quando la mela cade, e attribuiamo la caduta della mela alla gravità. Volendo, però, possiamo dire che l'inerzia della mela, una volta che questa si è liberata improvvisamente dal suo cammino curvo, la conduce al suolo.

Supponete che un ragazzo arrivi dopo che la mela è caduta e le tiri un calcio col piede nudo. Griderà di dolore perché il calcio gli ha fatto male alle dita del piede. Un newtoniano direbbe che l'inerzia della mela ha opposto resistenza al calcio del ragazzo. Un einsteiniano può dire la stessa cosa, ma può anche dire, a suo piacere, che le dita del piede del ragazzo hanno fatto accelerare all'indietro l'intero cosmo (compreso il piede) dando luogo ad un campo gravitazionale che ha attirato con grande forza la mela contro le dita del piede. È tutta questione di termini. Dal punto di vista matematico, la situazione è descritta da un unico gruppo di equazioni del campo nello spazio-tempo; ma (grazie al principio di equivalenza) si può parlarne alla buona con una qualsiasi delle due frasi newtoniane.

Sebbene la teoria della relatività sostituisca la gravità con una deformazione geometrica dello spazio-tempo, lascia però ancora senza risposta molti interrogativi fondamentali. La deformazione ha luogo istantaneamente attraverso lo spazio o si propaga come un moto ondulatorio? La maggioranza dei fisici pensa che la deformazione si propaghi come un'onda e si muova con la velocità della luce. Si congettura persino che le onde della

gravità consistano di minuscole particelle indivisibili di energia chiamate « gravitoni ». Finora nessun esperimento ha rivelato né le onde né i gravitoni.

Robert H. Dicke, un fisico della Princeton University, pensa che la gravità vada lentamente indebolendosi e sia oggi un 13% meno di quello che era quattro o cinque miliardi di anni fa, quando la Terra si formò. Se questo è vero, la Terra si sta forse espandendo e la sua superficie si sta screpolando nel processo in corso. E anche il Sole sarebbe in via di espansione. Due miliardi di anni fa sarebbe stato più piccolo, più denso e più caldo; il che spiegherebbe le condizioni tropicali che prevalevano, sembra, sulla maggior parte della Terra nelle prime ere geologiche. Attualmente siamo solo nel regno delle supposizioni; ma presto, forse, sarà possibile escogitare degli esperimenti per verificare la teoria di Dicke.

La teoria della relatività fornisce un nuovo modo di considerare la gravità e di descriverla, ma questa rimane ancora un fenomeno misterioso e poco comprensibile. Nessuno sa come sia collegato, se lo è, con l'elettromagnetismo. Einstein ed altri hanno cercato di sviluppare una « teoria del campo unificato » che unisca la gravità e l'elettromagnetismo in un unico gruppo di equazioni matematiche. Il risultato è stato deludente. Forse uno dei giovani lettori che leggono ora queste parole, se dotato del genio creativo di un Einstein, troverà un giorno come formulare una teoria del genere.

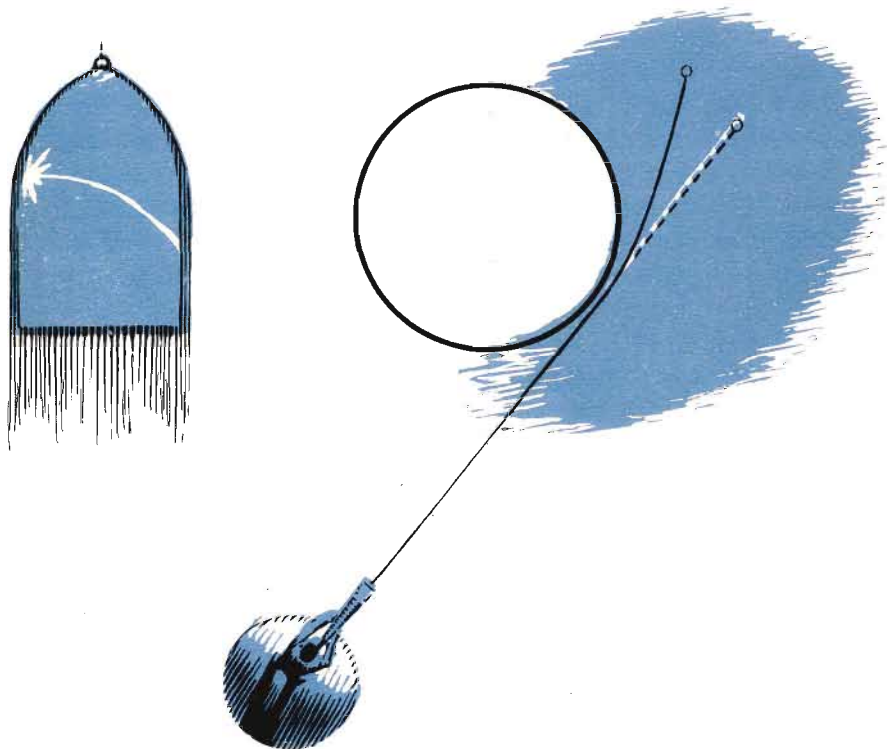
Ma la teoria della relatività generale è stata confermata dalle prove sperimentali? Sì, per quanto — e si capisce — non così completamente come la teoria ristretta. La prima conferma riguarda l'orbita di Mercurio, il pianeta più vicino al Sole. L'orbita di Mercurio è un'ellisse, ma l'ellisse a sua volta ruota lentamente. Le equazioni newtoniane della gravità spiegano il fatto in base all'influenza degli altri pianeti, ma prevedono una rotazione leggermente più lenta di quella effettivamente osservata. Le equazioni di Einstein prevedono una rotazione dell'orbita ellittica di un pianeta anche in assenza di altri pianeti; nel caso di Mercurio l'orbita prevista è molto più vicina a quella reale del-

l'orbita prevista da Newton. Gli altri pianeti hanno orbite più circolari, quindi è più difficile osservarne la rotazione, ma negli ultimi anni sono state effettuate delle misure delle orbite sia di Venere che della Terra che risultano in buon accordo con le equazioni di Einstein.

Una seconda previsione fatta da Einstein era che la luce del Sole mostrasse uno spostamento minimo verso il rosso. Secondo le equazioni della teoria generale, intensi campi gravitazionali hanno per effetto di rallentare il tempo. Ciò significa che ogni processo ritmico, come le vibrazioni di un atomo o il ticchettìo di un orologio, avverrebbe sul Sole a passo leggermente più lento che sulla Terra. Questo farebbe spostare verso il rosso lo spettro della luce solare. Tale deviazione è stata effettivamente osservata, ma è soggetta a tante altre interpretazioni che non fornisce una prova molto solida. (*The Scientific American*, marzo 1962, ragguaglia sulle più recenti ed accurate misure finora fatte dello spostamento verso il rosso della luce solare. J. E. Blamont e F. Roddier dell'Osservatorio Meudon in Francia, usando un metodo completamente nuovo, trovarono uno spostamento al rosso nella riga di assorbimento dello stronzio tanto prossimo allo spostamento previsto dalla relatività generale da fornirne per la prima volta una notevole conferma. Per usare i termini della rivista, « la precisione senza precedenti » della misurazione « ha, a quanto sembra, finalmente messo a riposo uno scheletro che si era aggirato nel ripostiglio della fisica per più di 40 anni »).

Una stella nana bianca vicinissima a Sirio, nota come il « compagno » di Sirio, ha una massa sufficientemente grande da produrre uno spostamento verso il rosso trenta volte maggiore di quello del Sole. Anche questo spostamento è stato rilevato e ha offerto una ulteriore conferma. Tuttavia, le conferme più solide dell'azione della gravità sul ritmo del tempo sono state recentemente ottenute in laboratorio. Le descriveremo nel capitolo 8.

Di tutte le verifiche della teoria generale, la più spettacolare ebbe luogo nel 1919 durante un'eclissi totale di Sole. Einstein aveva ragionato come segue. Se un ascensore si innalzasse nello spazio interstellare con velocità crescente, un raggio di luce che

internamente all'ascensore andasse da una parete all'altra si curverebbe verso il basso percorrendo un cammino parabolico. Il che verrebbe considerato un effetto d'inerzia; ma secondo la teoria generale, si può assumere l'ascensore come sistema fisso di riferimento e considerare l'incurvarsi del raggio come un effetto gravitazionale. La gravità, allora è capace di incurvare i raggi di luce. La curvatura è troppo piccola per essere rivelata da un esperimento di laboratorio, ma può essere misurata dagli astronomi durante un'eclissi totale di Sole. Poiché la luce del Sole è intercettata dalla Luna, le stelle vicinissime all'orlo del Sole diventano visibili. La luce proveniente da queste stelle attraversa la zona di maggior intensità del campo gravitazionale del Sole. Qualsiasi cambiamento nella posizione apparente di queste stelle starebbe ad indicare che la gravità del Sole fa deviare la loro luce. Maggiore è il cambiamento di posizione, maggiore è la deviazione.

Attenzione, però! Quando si parla della « curvatura » di un raggio di luce dovuta alla gravità o all'inerzia, ricordiamoci che si tratta solo di un modo di esprimersi tridimensionale. La luce si incurva effettivamente, nello spazio. Ma nell'universo quadridimensionale minkowskiano dello spazio-tempo la luce continua, come nella fisica classica, a muoversi lungo delle geodetiche. Prende il cammino più diretto possibile. Il nostro immaginario superscienziato quadridimensionale per fare il grafico del cammino di un raggio di luce traccerebbe sempre nel suo diagramma dello spazio-tempo una retta, anche quando la luce attraversa campi gravitazionali intensi.

All'astronomo inglese Arthur Stanley Eddington fu affidata una spedizione di scienziati che si recò in Africa nel 1919 per osservare l'eclissi totale di Sole. Il compito principale della spedizione era di rilevare accuratamente le posizioni delle stelle vicine all'orlo del Sole. Anche la fisica di Newton accennava ad una curvatura della luce nei campi gravitazionali, ma le equazioni di Einstein prevedevano una deviazione doppia. Così la verifica poteva avere almeno tre possibili risultati:

1. Nessun cambiamento nella posizione delle stelle.
2. La deviazione è prossima a quella prevista dalla fisica newtoniana.
3. La deviazione è prossima a quanto Einstein aveva previsto.

Il primo risultato avrebbe invalidato sia le equazioni di Newton che quelle della teoria della relatività generale. Il secondo avrebbe sostenuto Newton e screditato Einstein. Il terzo avrebbe screditato Newton e sostenuto Einstein. Secondo una storiella che circolava in quel tempo, due astronomi discutevano le tre possibilità.

« E se ottenessimo », disse uno di loro, « una deviazione doppia di quella prevista da Einstein? »

« Allora », rispose l'altro, « Eddington diventerebbe pazzo. »

Per fortuna, la deviazione si dimostrò prossima alla previsione di Einstein. Fu la pubblicità che circondò questa spettacolare conferma della relatività generale a portare per la prima

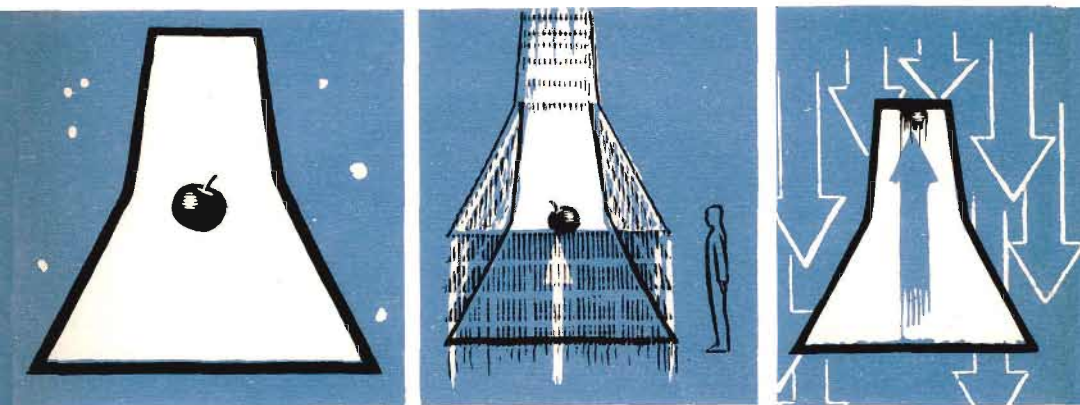
volta la teoria all'attenzione del pubblico comune. Oggi, gli astronomi sono propensi a considerare con scetticismo tale conferma. La difficoltà di eseguire delle misure precise della posizione delle stelle durante un'eclissi è maggiore di quanto Eddington supponesse, e ci sono stati dei divari nei risultati ottenuti durante diverse eclissi a partire dal 1919. In una riunione della Royal Society di Londra, nel febbraio 1962, un gruppo di scienziati discusse l'argomento. E si arrivò alla conclusione che le difficoltà sono così grandi che gli osservatori di un'eclissi non dovrebbero più eseguire misurazioni di questo genere.

Proprio come ci sono degli esperimenti (pochissimi in verità) che hanno confermato la relatività generale, ed innumerevoli esperimenti per ora non tentati o persino impensabili destinati a confermarla ulteriormente, così sono possibili esperimenti in grado di screditarla di più. George Gamow, fisico della Università del Colorado, ha descritto, in *The Scientific American*, marzo 1961, un esperimento di questo tipo che implica le antiparticelle.

È noto che le antiparticelle hanno massa inerte positiva; ma è stato congetturato che possano avere massa gravitazionale negativa. Se così fosse, ogni forza gravitazionale a cui fossero soggette le farebbe accelerare in direzione negativa. Un'antimela, fatta di antimateria, si sarebbe librata nel cielo anziché cadere sul naso a Newton. Se le antiparticelle abbiano davvero massa gravitazionale negativa non è stato ancora accertato, ma se l'avessero, la teoria della relatività si troverebbe in imbarazzo.

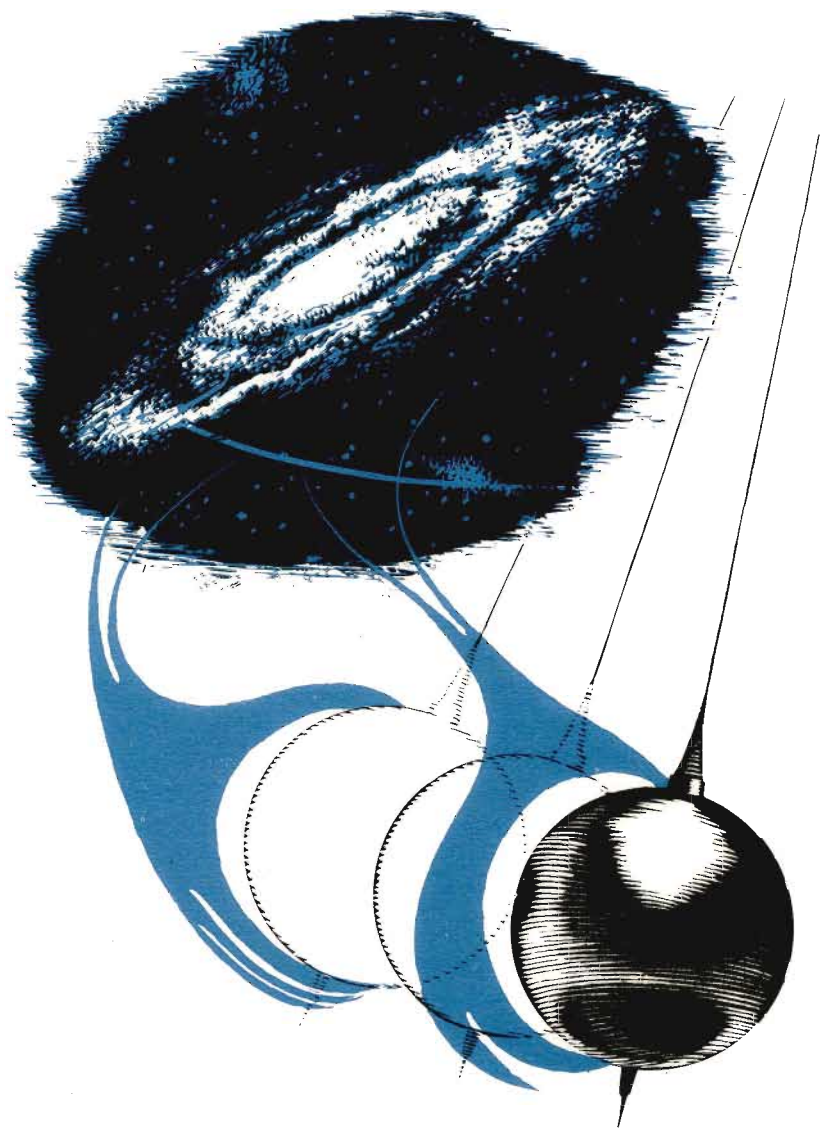
Per capire perché ci si troverebbe in difficoltà, immaginate una cosmonave sospesa nello spazio interstellare, immobile relativamente alle stelle. Fluttuante all'interno della cosmonave c'è una solitaria antimela con massa gravitazionale negativa. La cosmonave si mette in moto in direzione del soffitto con un'accelerazione di 1 g (g è l'accelerazione con cui cadono i gravi sulla Terra: circa 9,8 metri al secondo per secondo. Questo significa che ogni secondo la velocità aumenta di 9,8 metri al secondo).

Che cosa succede alla mela?

Dal punto di vista di un osservatore fuori della nave, ancorato al sistema inerziale del cosmo, la mela dovrebbe rimanere

esattamente dove si trova rispetto alle stelle. Nessuna forza agisce su di essa. La stessa nave non tocca la mela; la nave potrebbe anche essere lontana mille miglia. Il pavimento del compartimento si alzerebbe fino a colpire la mela. (Non dobbiamo preoccuparci di quello che avviene quando il pavimento colpisce la mela).

La situazione è del tutto diversa se assumiamo l'astronave come sistema fisso di riferimento. Allora l'osservatore deve supporre un campo gravitazionale operante all'interno della nave. Questo manderebbe la mela verso il soffitto con una accelerazione, relativamente alle stelle, di $2g$. Un principio fondamentale della relatività è stato violato: i due sistemi di riferimento non sono intercambiabili.

In altre parole, la massa gravitazionale è difficilmente conciliabile con la relatività generale, sebbene il concetto newtoniano di inerzia vi si accordi facilmente. La fisica classica adotta semplicemente il primo punto di vista. La cosmonave ha un moto assoluto relativamente all'etere. La mela rimane in quiete assoluta. Nessun campo gravitazionale viene a turbare il quadro.

La scoperta della massa gravitazionale negativa e del concomitante effetto di antigravità, conclude Gamow, « ci imporrebbe la scelta tra la legge di inerzia di Newton ed il principio di equivalenza di Einstein. L'autore si augura sinceramente che questo non abbia a succedere ».

Il principio di Mach

Il principio di equivalenza di Einstein dice che quando un corpo accelera o ruota, si crea un campo di forza che può essere considerato sia un campo di inerzia che un campo gravitazionale, a seconda della scelta del sistema di riferimento.

Ci domandiamo: questi campi di forza sono il risultato del moto relativo ad una struttura dello spazio-tempo che esiste indipendentemente dalla materia, oppure la struttura dello spazio-tempo è *creata* dalla materia; vale a dire, creata dalle galassie e dagli altri corpi materiali dell'universo?

Gli esperti sono discordi. Tutte le vecchie discussioni del XVIII e XIX secolo se lo « spazio » o l'« etere » esistano indipendentemente dalla materia continuano ad accompagnarci; sol-

tanto, sono ora discussioni sulla struttura dello spazio-tempo (chiamato talvolta il « campo metrico ») del cosmo. La maggior parte degli studiosi che per primi hanno scritto sulla relatività — Arthur Stanley Eddington, Bertrand Russell, Alfred North Whitehead ed altri — pensavano la struttura indipendente dalle stelle, sebbene naturalmente soggetta a distorsioni locali ad opera delle stelle. Più semplicemente, se nel cosmo non ci fossero altri corpi che la Terra, sarebbe ancora possibile per la Terra, così dicevano questi scrittori, ruotare relativamente a questa struttura dello spazio-tempo. (Non ha attinenza con l'argomento se la struttura abbia una curvatura generale positiva, negativa o nulla). Una cosmonave isolata, che fosse l'unico corpo nell'universo, potrebbe ancora accendere i suoi motori a razzo ed accelerare. Dentro alla nave i cosmonauti avvertirebbero ancora le reazioni d'inerzia dell'accelerazione. Una Terra isolata, ruotante nello spazio, si rigonfierebbe ancora all'equatore. Si rigonfierebbe perché delle particelle della sua materia percorrerebbero necessariamente cammini che non costituiscono geodetiche nella struttura dello spazio-tempo. Le particelle andrebbero contro la « grana » naturale dello spazio-tempo. Si riuscirebbe anche, su questa Terra isolata, a misurare un tipo di reazione d'inerzia detta la forza di Coriolis [1] e a determinare la direzione in cui la Terra gira.

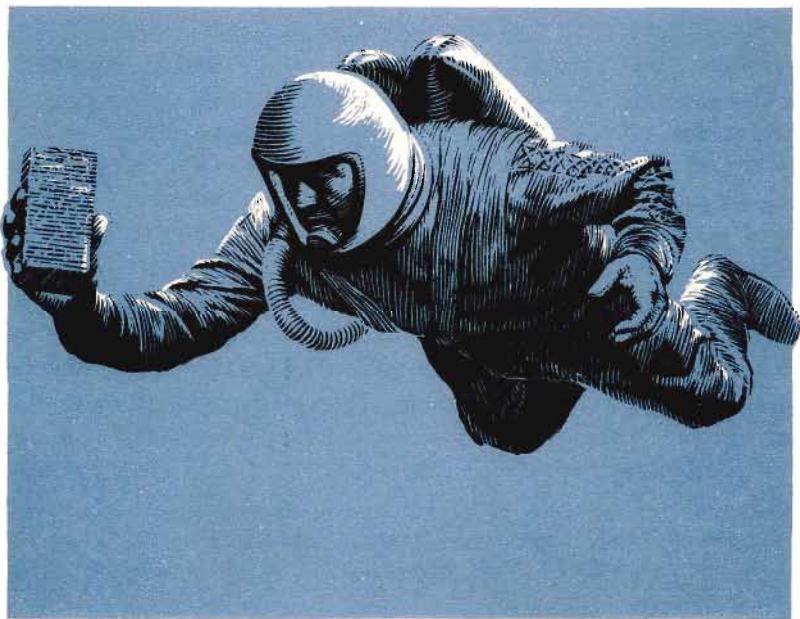
[1] Se un missile intercontinentale si muove verso nord o verso sud, la rotazione della Terra tende a farlo deviare verso destra nell'emisfero settentrionale, verso sinistra nell'emisfero meridionale. Questo effetto d'inerzia è detto forza di Coriolis da G. G. Coriolis, un ingegnere francese dell'inizio del XIX secolo, che per primo lo analizzò completamente. I cicloni ed altri movimenti vorticosi dell'atmosfera sono direttamente imputabili alle forze di Coriolis. Vedi « L'effetto Coriolis » di James E. McDonald in *The Scientific American*, maggio 1952, ristampato in *New Worlds of Modern Science*, ed. Leonard Engel, New York, Dell Books, 1956.

Einstein ammise che questa concezione poteva corrispondere al vero, ma (almeno da giovane) non la trovava di suo gusto. Preferiva invece un punto di vista avanzato in precedenza da un filosofo irlandese, il vescovo Berkeley. Se la Terra fosse l'unico corpo nell'universo, sosteneva Berkeley, sarebbe privo di senso dire che potrebbe ruotare. Delle idee in certo modo simili erano state sostenute nel XVII secolo dal filosofo tedesco G. Leibniz e dal fisico olandese C. Huygens, ma toccò ad Ernst Mach puntellare questa opinione con una plausibile teoria scientifica. Mach anticipò gran parte della teoria della relatività, ed Einstein ha riconosciuto quanto Mach abbia ispirato i suoi primi scritti. (Triste a dirsi, Mach da vecchio rifiutò di accettare la relatività).

Secondo Mach, un cosmo senza stelle non presenterebbe una struttura dello spazio-tempo relativamente alla quale la Terra possa ruotare. Perché ci siano dei campi gravitazionali (o di inerzia) capaci di far rigonfiare un pianeta all'equatore e di far traboccare l'acqua da un secchio in rotazione, ci devono essere delle stelle a creare una struttura dello spazio-tempo. Privato di una tale struttura lo spazio-tempo non possederebbe geodetiche. Non si potrebbe nemmeno dire che un raggio di luce, propagandosi attraverso lo spazio completamente vuoto, descriverebbe una geodetica, perché in assenza di una struttura dello spazio-tempo il raggio non saprebbe prendere un cammino piuttosto che un altro. Come disse uno scrittore, A. d'Abro (nel suo eccellente libro *The Evolution of Scientific Thought* [L'evoluzione del pensiero scientifico]), non saprebbe che cammino prendere. Persino l'esistenza di un corpo sferico come la Terra sarebbe forse impossibile. Le particelle della Terra sono tenute insieme dalla gravità, e la gravità fa muovere le particelle lungo delle geodetiche.

Senza una struttura dello spazio-tempo, la Terra (come dice d'Abro) non saprebbe che forma prendere. Una volta Eddington descrisse con spirito la situazione: in un universo completamente vuoto (se Mach ha ragione) i campi gravitazionali di Einstein cadrebbero a terra!

Ecco un'esperienza ideale descritta da d'Abro che aiuta a chiarire la posizione di Mach. Immaginate un cosmonauta fluttuante nello spazio. Egli è l'unico corpo dell'universo. Tiene in mano un mattone. Noi sappiamo che il mattone non avrebbe peso (massa gravitazionale). Avrebbe massa inerte? Se il cosmonauta cercasse di sollevare il mattone nello spazio, questo opporrebbe resistenza al movimento della mano? Dal punto di vista di Mach, no. Senza le stelle nel cosmo a fornire un campo metrico dello spazio-tempo, non c'è nulla rispetto a cui il mattone possa accelerare. Naturalmente, c'è il cosmonauta, ma la sua massa è tanto piccola che ogni effetto relativo ad esso sarebbe trascurabile.

Einstein diede alla veduta di Mach il nome di « principio di Mach ». E sperò dapprima di riuscire ad incorporarla nella teoria della relatività. Una volta arrivò persino a concepire un modello dell'universo (che discuteremo nel capitolo 9), in cui la struttura dello spazio-tempo non aveva esistenza se non in quanto

creata dalle stelle e dagli altri corpi materiali. « In una coerente teoria della relatività », scrisse Einstein nel 1917 quando pubblicò la sua prima descrizione matematica di questo modello, « non può esserci inerzia relativa allo " spazio ", ma solo un'inerzia di masse una relativamente all'altra. Se perciò ho una massa a distanza sufficiente da tutte le altre masse dell'universo, la sua inerzia deve scendere a zero ».

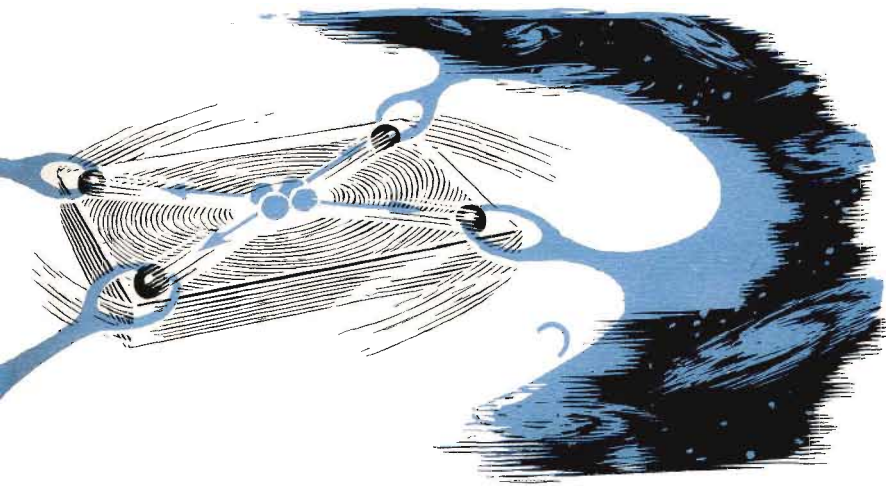
In seguito vennero scoperte diverse pecche nel modello cosmico di Einstein ed egli fu costretto ad abbandonare il principio di Mach; ma il principio continua ad esercitare un grande fascino sui cosmologhi di oggi. E non è difficile capire perché. Il punto di vista opposto, quello secondo cui si ammette l'esistenza di una metrica dello spazio-tempo anche in assenza di stelle, è veramente molto vicino alla vecchia teoria dell'etere. Invece di un'immobile, invisibile gelatina chiamata etere, c'è un'immobile invisibile struttura dello spazio-tempo. Supponendo questa fissa, le accelerazioni e le rotazioni assumono un sospetto carattere assoluto. Infatti, i fautori di questa concezione non hanno esitato a parlare delle rotazioni e delle accelerazioni come « assolute ». Ma gli effetti di inerzia sono relativi, non ad una simile struttura, bensì solo ad una struttura generata dalle stelle: allora resta conservata in forma purissima la relatività.

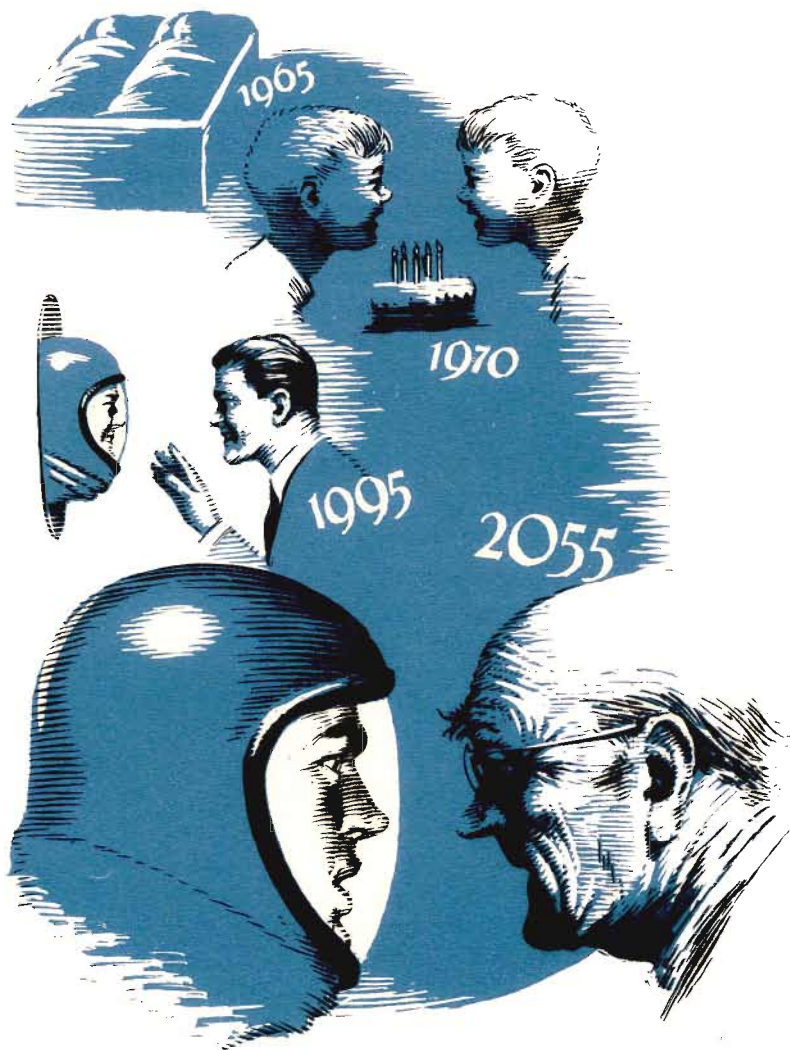
Un cosmologo inglese, Dennis Sciama, ha sviluppato una ingegnosa teoria lungo le linee machiane e ne offre una piacevole descrizione nel suo libro di divulgazione, *The Unity of the Universe* [L'unità dell'universo]. A suo avviso, gli effetti d'inerzia dovuti alla rotazione o all'accelerazione sono il risultato di un moto relativo rispetto alla materia complessiva dell'universo! Le equazioni di Sciama dimostrano che l'influenza delle stelle molto vicine sull'inerzia è sorprendentemente piccola. Tutte le stelle nella nostra Galassia, secondo Sciama, contribuiscono solo per un decimilionesimo alla forza d'inerzia sulla Terra, la maggior parte della quale è il prodotto di lontane galassie. Sciama calcola che l' 80 % della forza d'inerzia sia il risultato del moto relativo a galassie tanto remote da non essere state ancora scoperte dai nostri telescopi!

Ai tempi di Mach si ignorava l'esistenza di altre galassie oltre alla nostra, e che la nostra Galassia ruotava. Gli astronomi sanno oggi che la forza centrifuga, originata dalla rotazione, fa allargare enormemente la nostra Galassia. Secondo la concezione di Mach, questo rigonfiamento potrebbe aver luogo soltanto se grandissime quantità di materia esistessero fuori della Galassia stessa. Se Mach avesse conosciuto l'effetto d'inerzia prodotto dalla rotazione sulla nostra Galassia, sarebbe stato capace di dedurre l'esistenza di altre galassie cinquant'anni prima che una qualunque di esse venisse scoperta.

Forse il carattere sensazionale della concezione di Sciama sarà ancora più evidente con la seguente illustrazione. Un tempo

possedevo un giuoco di pazienza, che consisteva in una scatoletta quadrata ricoperta da un vetro, nella quale si trovavano quattro palline d'acciaio. Ogni pallina poteva scorrere in un solco che andava dal centro del quadrato ad uno dei vertici. Si trattava di far arrivare contemporaneamente le quattro palline ai quattro angoli. Il solo modo di riuscire era di posare la scatoletta in piano sopra un tavolo e di farla ruotare. La forza centrifuga faceva il gioco. Se Sciama ha ragione, non si potrebbe venire a capo del gioco in questa maniera se non fosse per l'esistenza di miliardi di galassie a enormi distanze dalla nostra.

L'avvenire della teoria della relatività procederà nella direzione di Mach e di Sciama, o conserverà una struttura assoluta

dello spazio-tempo, indipendente dalle stelle? Nessuno è in grado di dirlo. Se sarà sviluppata una riuscita teoria del campo, in cui le particelle elementari di materia possono essere spiegate in termini di un campo dello spazio-tempo, allora le stelle stesse diverranno semplicemente un aspetto di quel campo. Invece di essere le stelle a generare la struttura, sarà la struttura a generare le stelle. Per il momento, però, tutto questo non è che oziosa speculazione.

1965
1970
1995
2055

Il paradosso dei gemelli

Quale fu la reazione degli scienziati e dei filosofi d'avanguardia quando gettarono il loro primo sguardo sul nuovo mondo della relatività? La reazione fu di vario genere. La maggior parte dei fisici e degli astronomi, disorientati dalle violazioni del senso comune e dalle difficoltà matematiche della teoria generale, conservarono un prudente silenzio. Ma gli scienziati e i filosofi in grado di capirla furono propensi ad accogliere la relatività allegramente. Abbiamo già accennato che Eddington si era immediatamente accorto della grandezza dell'opera di Einstein. Moritz Schlick, Bertrand Russell, Rudolf Carnap, Ernst Cassirer, Alfred North Whitehead, Hans Reichenbach e molti altri filosofi eminenti furono i primi nella schiera degli entu-

siasti a scrivere sulla teoria della relatività, a cercare di chiarire quanto in essa era implicito. Il libro di Russell, *The ABC of Relativity* [L'ABC della Relatività, Longanesi], apparve nel lontano 1925, ma è ancor oggi uno dei migliori libri divulgativi che sia mai stato scritto sulla relatività.

Talora gli scienziati erano incapaci di scuotersi di dosso le antiche abitudini newtoniane di pensiero. Sotto molti aspetti rassomigliavano agli scienziati contemporanei di Galileo che non riuscivano a persuadersi che Aristotele potesse aver sbagliato. Lo stesso Michelson, un matematico limitato, non accettò mai la relatività, nonostante fosse stato il suo grande esperimento a lastricare la via della teoria ristretta. Ancora nel 1935, studente all'Università di Chicago, ebbi a seguire un corso di astronomia del professor William D. Macmillan, uno scienziato stimatissimo che disprezzava apertamente la relatività.

« Noi della presente generazione siamo troppo impazienti per aspettare qualche cosa », scriveva Macmillan nel 1927. « Non sono passati quarant'anni dal fallimento di Michelson nello scoprire il moto della Terra rispetto all'etere, e abbiamo cancellato la lavagna, fabbricato un postulato secondo cui questa verifica non si può fare in nessun modo, e costruito una meccanica non newtoniana coerente col postulato. Il successo ottenuto da questa teoria è un meraviglioso tributo alla nostra attività intellettuale ed alla nostra ingenuità, ma non sono altrettanto certo che lo sia al nostro giudizio ».

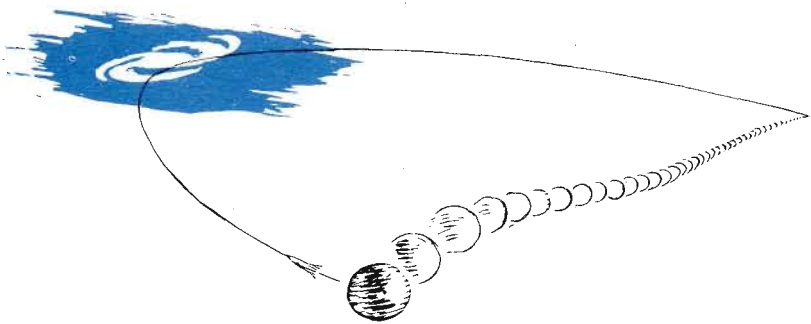
Obbiezioni di ogni sorta furono mosse alla relatività. Una delle prime e più tenaci si fondava su un paradosso a cui per primo aveva accennato lo stesso Einstein, nel suo articolo sulla relatività ristretta. (La parola « paradosso » è usata nell'accezione di qualcosa che si oppone al senso comune, non a qualcosa che sia contradditorio logicamente). È un paradosso molto attuale oggi, perché i progressi nel volo spaziale, uniti al progresso nella costruzione di congegni per misurare il tempo straordinariamente precisi, possono presto metterci in grado di verificarlo in maniera diretta.

Questo paradosso viene di solito presentato come un'espe-

rienza ideale che coinvolge due gemelli. Essi sincronizzano i loro orologi. Uno dei gemelli sale su un'astronave e fa un lungo viaggio attraverso lo spazio. Quando ritorna, i gemelli confrontano gli orologi. Secondo la teoria della relatività ristretta, l'orologio del gemello che ha viaggiato sarà leggermente più indietro. In altre parole, il tempo sull'astronave avrà tenuto un ritmo più lento che sulla Terra. Finché il viaggio spaziale si limita al sistema solare, ed avviene a velocità relativamente basse, questa differenza di tempo sarà trascurabile. Ma per grandi distanze, e con velocità confrontabili con quella della luce, la « dilatazione del tempo » (come talvolta si dice) può essere grande. Non è inconcepibile che un giorno si riesca a far accelerare lentamente un'astronave fino a raggiungere una velocità appena inferiore a quella della luce. Questo renderebbe possibili le visite ad altre stelle, forse anche dei viaggi in altre galassie. Così il paradosso dei gemelli è qualcosa di più che un gioco da salotto; rischia di essere, un giorno, esperienza comune dei viaggiatori dello spazio.

Supponete che il gemello astronauta percorra una distanza di 1000 anni luce e ritorni: una piccola distanza a paragone del diametro della nostra Galassia. Siamo sicuri che l'astronauta non muoia molto prima di aver finito il viaggio? Il suo viaggio non richiederebbe, come succede in tanti racconti di fantascenza, un'intera colonia di uomini e donne, in modo che varie generazioni si succedano mentre la nave procede nel suo lungo viaggio interstellare?

La risposta dipende dalla velocità dell'astronave. Se essa viaggia a velocità vicinissima alla velocità limite della luce, il tempo all'interno della nave avrà un ritmo molto più lento. Giudicato secondo il tempo della Terra, il viaggio richiederà, naturalmente, più di 2000 anni. Giudicato dal viaggiatore nell'astronave, se questa viaggia abbastanza veloce, il viaggio può richiedere solo qualche decennio!

Per i lettori che amano dati precisi, ecco un calcolo fatto recentemente da Edwin M. McMillan, un fisico nucleare dell'Università di California, a Berkeley. Un cosmonauta viaggia

dalla Terra alla nebulosa di Andromeda, che dista circa 2 milioni di anni-luce. Egli copre il percorso tenendo per la prima metà della distanza un'accelerazione costante di $2g$, e per la seconda metà un'accelerazione costante negativa di $2g$ fino a raggiungere la nebulosa. (Diciamo per inciso che questo è uno dei mezzi indicati per mantenere un campo gravitazionale costante dentro l'astronave per l'intera durata di questo lungo viaggio, senza far ruotare la nave). Nel viaggio di ritorno si ripete lo stesso procedimento. Secondo l'orologio dell'astronauta, il viaggio dura 29 anni. Secondo l'orologio della Terra sono passati quasi 3 milioni di anni!

È chiaro come da ciò nasca ogni sorta di possibilità affascinanti. Uno scienziato quarantenne e la sua assistente di laboratorio diciottenne si innamorano. Ma sentono che la loro differenza d'età preclude loro il matrimonio. Allora lo scienziato parte per un lungo viaggio spaziale, che si svolge a velocità prossima a quella della luce. Ritorna a 41 anni. Nel frattempo, sulla Terra la sua ragazza è diventata una donna di 33 anni. Forse, però, non è riuscita ad attendere 15 anni il ritorno del suo innamorato, e ha sposato qualcun altro. Affranto dal dolore, lo scienziato riparte per un altro lungo viaggio. È anche curioso di sapere se una certa teoria che ha pubblicato verrà confermata o abbandonata dalle generazioni successive. A 42 anni ritorna sulla Terra. La sua ragazza di prima è già morta da tempo. Ma, quel che è peggio, la sua teoria favorita è stata demolita. Umiliato, lo scienziato affronta un viaggio ancora più lungo e ritorna all'età di 45 anni per vedere come è il mondo qualche migliaio di anni dopo. Forse, come il viaggiatore nel tempo della novella di H. G. Wells *La macchina del tempo*, troverà che l'uma-

nità è diventata una cosa superata. E si sente spaesato, adesso. La macchina del tempo di Wells poteva andare sia avanti che indietro, ma il nostro scienziato solitario non ha modo di riportarsi indietro nel fiume della storia umana a cui egli appartiene.

Se questa sorta di viaggio nel tempo divenisse una realtà, sorgerebbero problemi morali inconsueti. C'è qualcosa di male, per esempio, se una ragazza sposa il proprio pro-pro-pro-pro-pro-nipote?

Vi prego però di notare che questo tipo di viaggio nel tempo evita tutti i trabocchetti logici che affliggono la fantascienza, come quello di piombare nel passato per uccidere i propri genitori prima di essere nati, o di balzare nel futuro e spararsi. Prendete, ad esempio, in considerazione la situazione di Miss Bright descritta dalla filastrocca:

Bright era una giovinetta
Che della luce viaggiava più in fretta.
Se ne partì un bel giorno,
Alle regole conforme,
E la notte prima era già di ritorno.

Se Miss Bright è di ritorno la notte prima, allora deve aver incontrato un duplicato di se stessa. Altrimenti non si sarebbe trattato proprio della notte prima. Ma è escluso che ci fossero due Miss Bright la notte prima, perché la nostra viaggiatrice nel tempo prende il volo senza ricordare di aver incontrato il giorno prima il proprio duplicato. È evidente che c'è una palese contraddizione. *Quel* genere di viaggio nel tempo non è possibile logicamente se non si ammette l'esistenza di mondi paralleli che corrano lungo differenti corsi del tempo. Ma anche con questo trucco le cose diventano complicatissime.

Osservate anche che la forma einsteiniana di viaggio nel tempo non conferisce al viaggiatore una autentica immortalità, e nemmeno la longevità. Per quanto *lo* riguarda, invecchia sempre al ritmo normale. È solo il « tempo proprio » della Terra che al viaggiatore sembra galoppare a rotta di collo.

Henry Bergson, il famoso filosofo francese, fu il più illustre pensatore che abbia incrociato le spade con Einstein a causa del paradosso dei gemelli. Egli scrisse abbastanza a lungo in merito mettendo in ridicolo tutte quelle che considerava assurdità logiche. Purtroppo, le sue parole dimostrano semplicemente che si può essere un grande filosofo senza sapere molto di matematica. In questi ultimi anni sono state nuovamente sollevate le stesse obbiezioni. Un filosofo inglese, Herbert Dingle, è più che mai combattivo oggi nel rifiutarsi di credere al paradosso. Per anni ha continuato a scrivere articoli arguti in proposito, accusando i vari esperti di relatività di essere ottusi e evasivi. Colla nostra superficiale analisi non saremo certo in grado di decidere la controversia, che si addentra immediatamente in equazioni complicate; ci basterà spiegare pressappoco perché gli esperti siano quasi tutti d'accordo sul fatto che il paradosso dei gemelli si verificherà in realtà proprio come Einstein ha descritto.

L'obbiezione di Dingle, la più valida contro il paradosso, si annuncia così. Secondo la teoria della relatività generale, non esiste alcuna forma di moto assoluto, non c'è alcun sistema di riferimento « privilegiato ». È sempre possibile scegliere un corpo in moto come sistema fisso di riferimento senza far violenza a nessuna legge naturale. Quando si sceglie la Terra come riferimento, l'astronauta compie il suo viaggio, ritorna e si trova più giovane di suo fratello rimasto a casa. Benissimo. Ma che succede se è l'astronave ad essere assunta come sistema di riferimento? Dovremo ammettere che la Terra si allontani dalla nave per un lungo viaggio e poi ritorni indietro. Quando la Terra fa ritorno all'astronave, non sarà il passeggero della Terra a essere più giovane? In tal caso, la situazione è più che un paradossale affronto al senso comune; è una chiara contraddizione logica. Evidentemente non può essere che ciascun gemello sia più giovane dell'altro.

A Dingle piace concludere in questo modo: non resta, dunque, che supporre che dopo il viaggio i gemelli abbiano esattamente la stessa età, o abbandonare la relatività.

Senza addentrarci in nessun calcolo effettivo, non è difficile capire perché le alternative non siano così drastiche come Dingle vorrebbe. È vero che ogni moto è relativo, ma in questo caso c'è un'importantissima differenza tra il moto relativo dell'astronauta e il moto relativo del fratello rimasto a casa. *Il fratello rimasto a casa non si muove relativamente nell'universo.*

Quale influenza ha questo particolare sul paradosso?

Supponiamo che l'astronauta sia in viaggio per recarsi sul pianeta X, situato in qualche punto della Galassia. Egli viaggia a velocità costante. L'orologio del fratello rimasto a casa è ancorato al sistema inerziale della Terra, sulla quale c'è concordanza fra gli orologi perché sono tutti in quiete uno relativamente all'altro. L'orologio dell'astronauta è ancorato ad un diverso sistema inerziale, il sistema della nave. Se la nave continuasse a viaggiare per sempre, non ci sarebbe paradosso, perché non ci sarebbe modo di confrontare i due orologi. Ma l'astronave deve fermarsi al pianeta X e tornare indietro. E quando ciò avviene, ha luogo un cambiamento da un sistema inerziale in moto di allontanamento dalla Terra a un nuovo sistema inerziale in movimento verso la Terra. Il cambiamento è accompagnato da enormi forze d'inerzia quando la nave accelera durante l'inversione di marcia. Anzi, se l'accelerazione durante l'inversione fosse troppo grande, l'astronauta (e non il fratello rimasto a casa) resterebbe ucciso. Queste forze d'inerzia si determinano, naturalmente, perché l'astronauta accelera relativamente all'universo. Non sorgono sulla Terra, perché la Terra non subisce una simile accelerazione.

Da un certo punto di vista si può dire che le forze d'inerzia prodotte da questa accelerazione « provocano » un rallentamento nell'orologio dell'astronauta; da un altro, l'accelerazione indica semplicemente un cambiamento di sistema di riferimento. A causa di questo cambiamento la linea evolutiva dell'astronave, il suo cammino tracciato nel grafico quadridimensionale minkowskiano dello spazio-tempo diventa un percorso lungo il quale il « tempo proprio » complessivo del viaggio di andata e ritorno è inferiore al tempo proprio totale lungo la linea evolutiva del gemello rimasto a casa.

Sebbene l'accelerazione sia implicata nel cambiamento dei sistemi inerziali, il calcolo effettivo non richiede altro che le equazioni della teoria ristretta.

Le obbiezioni di Dingle restano, tuttavia, perché possiamo fare esattamente gli stessi calcoli supponendo che sia l'astronave e non la Terra il sistema fisso di riferimento. Adesso è la Terra che si allontana, cambia sistema inerziale e ritorna indietro. Perché non dovrebbero gli stessi calcoli, con le stesse equazioni, mostrare che il tempo proprio della Terra ha rallentato nello stesso modo? Dovrebbero, se non fosse per un fatto gigantesco: allorché la Terra si allontana, *l'universo intero si muove con essa.* Quando la Terra compie la sua inversione di marcia, lo fa anche l'universo. Questo universo in accelerazione genera un intenso campo gravitazionale. Come abbiamo spiegato a pag. 50, la gravità ha un effetto ritardante sugli orologi. Il ticchettio di uno stesso orologio, ad esempio, sarebbe più lento sul Sole che sulla Terra, più lento sulla Terra che sulla Luna. Ora risulta, una volta eseguiti i calcoli appropriati, che il campo gravitazionale generato dal cosmo in accelerazione rallenta gli orologi dell'astronave fino a farli differire dagli orologi della Terra esattamente della stessa quantità di prima. Il campo gravitazionale non ha, naturalmente, alcun effetto sugli orologi della Terra. La Terra non si muove relativamente al cosmo; quindi, non c'è alcun campo gravitazionale rispetto alla Terra.

È istruttivo immaginare una situazione in cui risulti la stessa differenza di tempo, anche senza che entrino in giuoco delle accelerazioni. L'astronave A passa accanto alla Terra a velocità uniforme nel suo viaggio verso il pianeta X. Quando l'astronave incrocia la Terra mette a zero i propri orologi. La nave A prosegue a velocità uniforme verso il pianeta X, dove incrocia l'astronave B, in moto con velocità uniforme in senso opposto. Quando le navi si incrociano, A radiotrasmette a B la durata di tempo (misurata dal proprio orologio) trascorsa dopo il suo incontro con la Terra. La nave B prende nota dell'informazione e continua con moto uniforme verso la Terra. Quando incrocia la Terra, le radiotrasmette il tempo impiegato da A nel viaggio dalla Terra

al pianeta X, insieme al tempo impiegato da B (misurato dall'orologio di B) per compiere il viaggio dal pianeta X alla Terra. La somma di questi due intervalli temporali sarà minore del tempo (misurato dall'orologio della Terra) trascorso tra il momento in cui l'astronave A si è incrociata con la Terra e il momento in cui B ha incrociato la Terra.

Questa differenza di tempo può essere calcolata con le equazioni della teoria ristretta. Non è minimamente implicata alcuna accelerazione. Naturalmente questa volta non c'è un paradosso dei gemelli, perché non c'è un astronauta che parte e ritorna. Supponiamo che il gemello viaggiatore si allontani sulla nave A e ritorni a bordo di B. Non c'è modo di farlo senza trasferirsi da un sistema inerziale ad un altro. Per eseguire questo cambio, il gemello viaggiatore deve subire delle forze d'inerzia incredibilmente intense. Queste forze indicano il suo cambiamento di sistema inerziale. Volendo, possiamo dire che le forze d'inerzia rallentano il suo orologio. Però, se l'intero episodio è osservato dal punto di vista del gemello che viaggia, assunto tale gemello come sistema fisso di riferimento, entra a far parte del quadro un cosmo in mutamento che genera dei campi gravitazionali. (La maggior fonte di confusione quando si discute il paradosso dei gemelli è costituita dal fatto che la situazione può essere verbalmente descritta in tante maniere diverse). Indipendentemente dal punto di vista adottato, le equazioni della relatività danno sempre la stessa differenza di tempo, una differenza spiegabile in base alla sola teoria ristretta. È soltanto per controbattere l'obbiezione di Dingle che si deve tirare in ballo la teoria generale.

Non si ripeterà mai abbastanza che non è esatto domandare quale situazione è « giusta »: è il gemello cosmonauta che si allontana e ritorna, o sono invece il gemello rimasto a casa ed il cosmo ad allontanarsi e a tornare? Non c'è che un'*unica* situazione, un moto relativo dei gemelli. Ci sono però due modi diversi di parlarne. Nel primo, un cambiamento di sistemi inerziali da parte del cosmonauta, con le forze d'inerzia che ne conseguono, spiega la differenza nell'invecchiare. Nel secondo le forze gravita-

zionali prevalgono sull'effetto di un cambiamento di sistema inerziale da parte della Terra. *Secondo entrambi i punti di vista il gemello rimasto e il cosmo non si muovono l'uno rispetto all'altro.* In tal modo la situazione dei due uomini è totalmente diversa, sebbene sia strettamente osservata la relatività del moto. La paradossale diversità nell'invecchiare trova la sua spiegazione, qualunque dei due gemelli sia supposto in quiete. Non c'è alcun bisogno di abbandonare la teoria della relatività.

Possiamo ora porci una domanda interessante: che cosa succederebbe se il cosmo non contenesse altro che due astronavi, A e B? La nave A mette in funzione i suoi motori a razzo, fa un lungo viaggio e ritorna. Gli orologi, precedentemente sincronizzati, delle due navi si ritroverebbero in accordo? La risposta varia a seconda che si adotti il concetto di inerzia di Eddington o il punto di vista machiano di Dennis Sciama. In base alla concezione di Eddington la risposta è « sì ». L'astronave A accelera relativamente alla struttura metrica spazio-tempo del cosmo; la nave B, no. La situazione rimane asimmetrica e ne risulta la solita differenza nell'invecchiare. Dal punto di vista di Sciama, la risposta è « no ». L'accelerazione è priva di significato se non in rapporto ad altri corpi materiali. In questo caso gli unici corpi materiali sono le due astronavi. La situazione è perfettamente simmetrica. Anzi, non ci sono sistemi inerziali di cui parlare, perché non c'è inerzia (salvo una debolissima, trascurabile inerzia dovuta alla presenza delle due navi). In un cosmo senza inerzia è difficile prevedere che cosa succederebbe se un'astronave accendesse i suoi motori a razzo! Sciama afferma, con minimizzazione tipicamente inglese: « La vita, in un universo così, sarebbe del tutto differente ».

Poiché il rallentamento del ritmo del tempo per il gemello che viaggia può essere considerato un effetto della gravitazione, qualsiasi esperimento che mostri un rallentamento del tempo dovuto alla gravità, fornisce una specie di prova indiretta del paradosso dei gemelli. Negli ultimi anni si sono avute parecchie conferme del genere attraverso un nuovo meraviglioso strumento da laboratorio chiamato effetto Mössbauer. Un giovane fisico te-

desco, Rudolf L. Mössbauer, scoprì nel 1958 il modo di fabbricare un « orologio nucleare » che tiene il tempo con precisione incredibile. Immaginate un orologio che effettui cinque battiti al secondo ed un altro orologio dal ritmo tanto vicino al primo da aver perso, dopo un milione di milioni di battiti, solamente un centesimo di battito. L'effetto Mössbauer è capace di scoprire subito che il secondo orologio è più lento del primo! Esperimenti che utilizzano l'effetto Mössbauer hanno dimostrato che il tempo alle fondamenta di un fabbricato (dove è maggiore la gravità) ha un ritmo un po' più lento del tempo in cima allo stesso fabbricato. « Una dattilografa al lavoro al primo piano dell'Empire State Building », ha rilevato Gamow, « invecchierà più lentamente della sua gemella che lavora all'ultimo piano ». La differenza nell'invecchiare è naturalmente infinitesima; tuttavia è misurabile.

Alcuni fisici inglesi hanno scoperto anche, servendosi dell'effetto Mössbauer, che il ritmo di un orologio nucleare rallenta un poco se questo viene posto sul margine di un disco in rapida rotazione anche del diametro di soli sei pollici. L'orologio in rotazione può essere considerato come il gemello viaggiante sottoposto a dei cambiamenti continui di sistema inerziale (o viceversa, come il gemello soggetto ad un campo gravitazionale, se il disco è considerato in quiete e il cosmo in rotazione); è la prova più diretta fino ad oggi del paradosso dei gemelli. Una verifica ancor più diretta si avrà quando un orologio nucleare sarà posto in un satellite artificiale, in orbita a gran velocità attorno alla Terra, e poi ricuperato e confrontato con l'orologio rimasto a casa. Naturalmente si sta sempre più avvicinando l'epoca in cui un astronauta sarà in grado di procedere alla verifica definitiva, portando con sé un orologio nucleare in un lungo viaggio spaziale. Nessun fisico, salvo il professor Dingle, dubita che al ritorno l'orologio dell'astronauta sia leggermente fuori fase rispetto ad un orologic nucleare rimasto sulla Terra.

Tuttavia, bisogna essere sempre preparati alle sorprese. Ricordate l'esperimento Michelson-Morley!

Modelli dell'universo

Nessun fisico oggi mette più in discussione la teoria della relatività ristretta e pochi discutono sui princìpi fondamentali della teoria generale. È vero che la teoria generale lascia insoluti molti problemi importanti. È anche vero che le osservazioni e gli esperimenti che convalidano la teoria sono scarsi e inconcludenti. D'altra parte, anche se le conferme mancassero del tutto, la teoria generale resterebbe enormemente affascinante per le grandi semplificazioni che introduce nella fisica.

Semplificazioni? Strana parola da usare riguardo ad una teoria che adopera una matematica così alta che una volta fu detto che non più di dodici uomini in tutto il mondo erano in grado di capirla (un'esagerazione, a proposito, anche all'epoca in cui

l'osservazione era corrente). La matematica della relatività è veramente complicata, ma la sua complessità è compensata da una semplificazione notevole nel quadro generale. La riduzione di inerzia e gravità allo stesso fenomeno, ad esempio, basta da sola a fare della relatività generale un mezzo quanto mai efficiente di osservare il mondo.

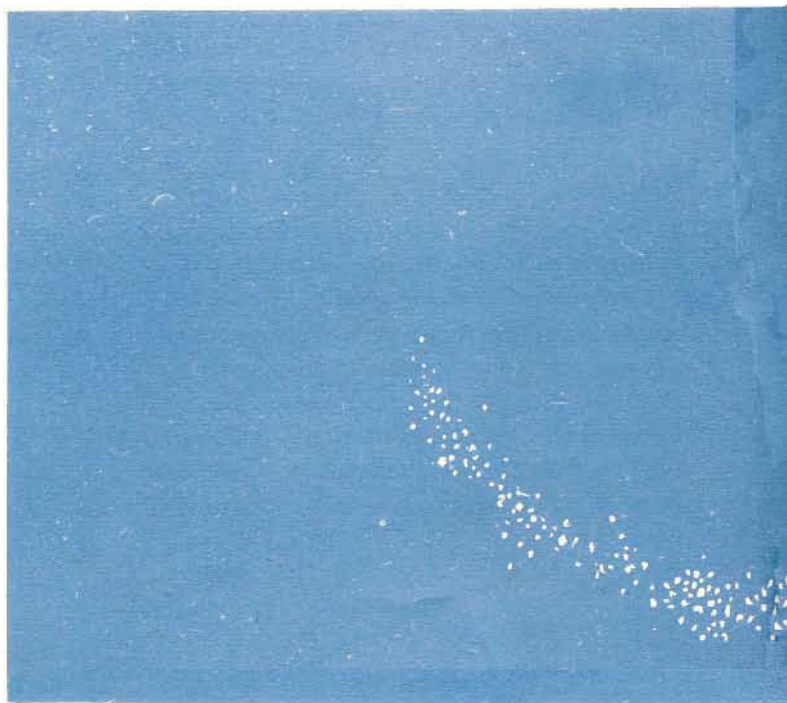
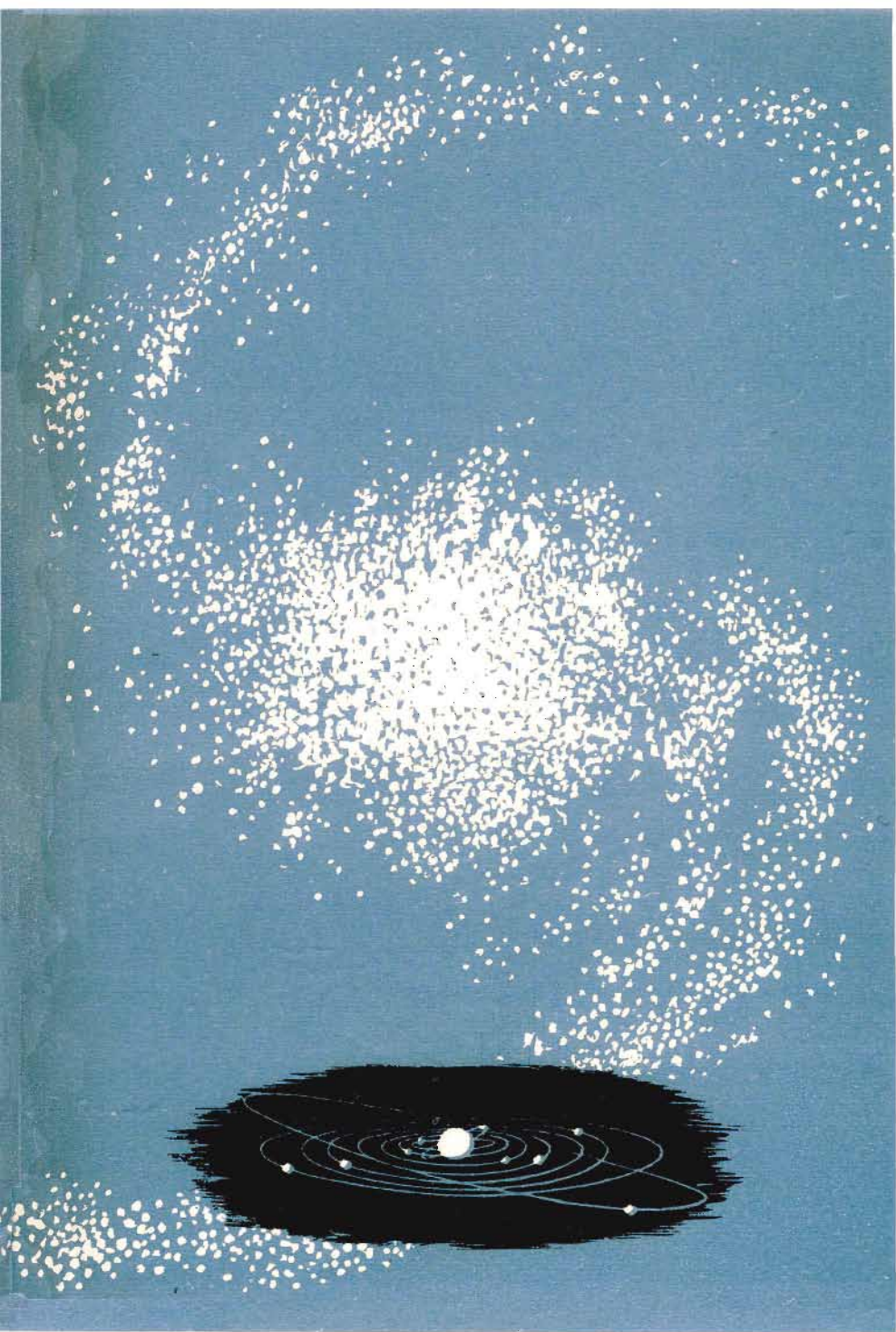
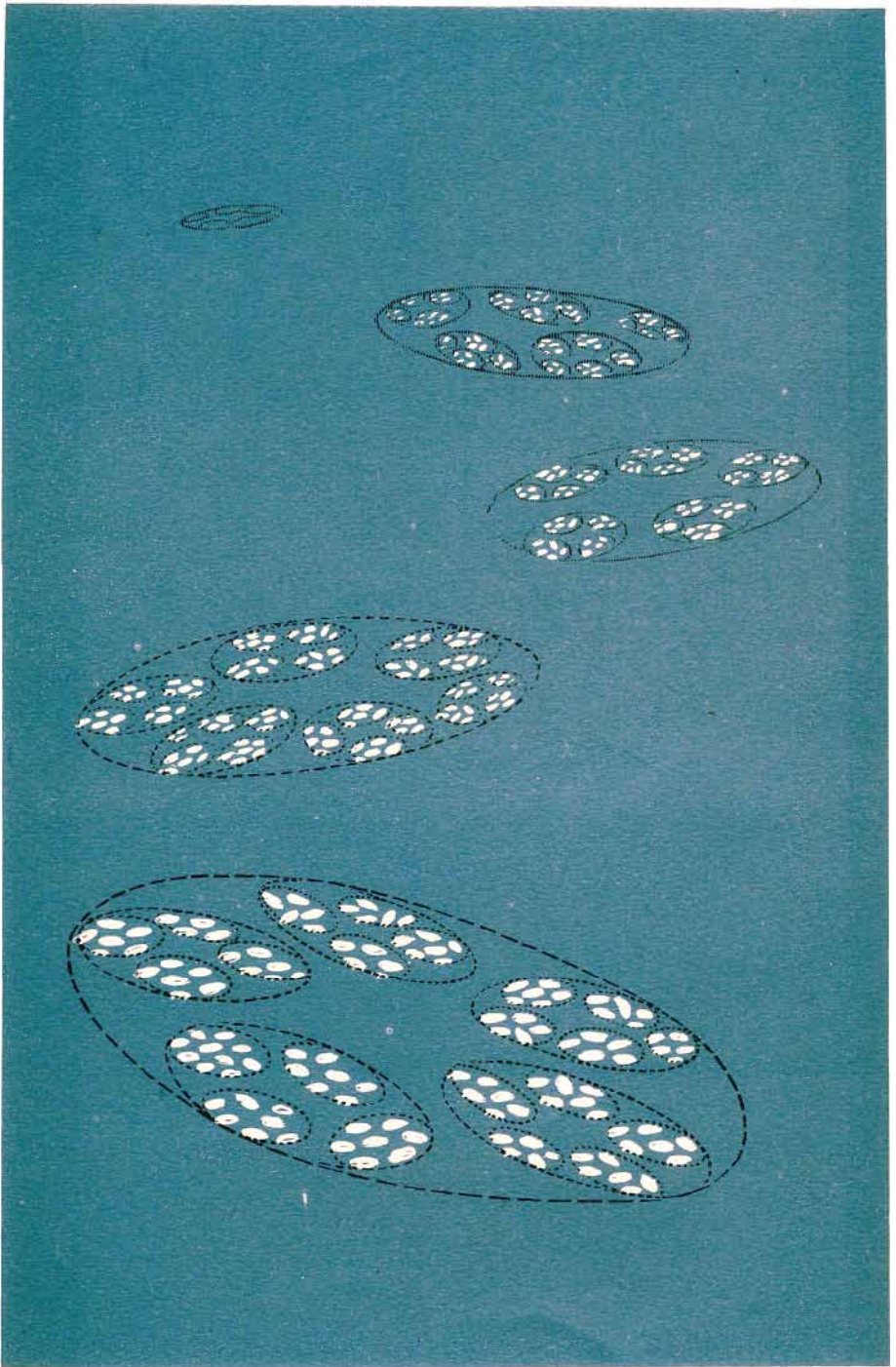
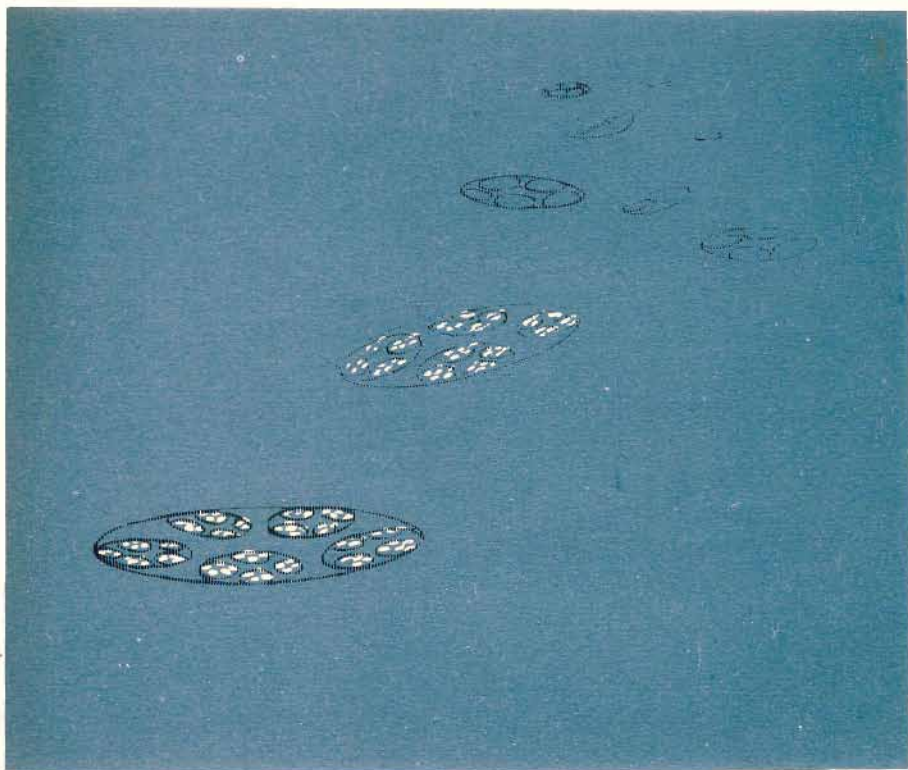
Einstein lo mise in rilievo nel 1921 in una conferenza sulla relatività tenuta all'Università di Princeton. « La possibilità », egli disse, « di spiegare l'eguaglianza numerica di inerzia e gravitazione con l'unicità della loro natura conferisce alla teoria della relatività generale, ne sono convinto, una tale superiorità sulle concezioni della meccanica classica, che tutte le difficoltà incontrate devono essere considerate trascurabili al confronto... ».

Inoltre, la teoria della relatività possiede quella che i matematici amano chiamare « eleganza »: una sorta di grandiosità artistica. « Chiunque sia amante del bello », dichiarò una volta Lorentz, « deve desiderare che sia vera ».

In questo capitolo sono messi da parte gli aspetti più saldi e accettati della relatività e il lettore viene immerso in una regione nebulosa di forti controversie; in una regione in cui le opinioni non sono se non suggerimenti con beneficio d'inventario, da accettare o respingere in base a testimonianze che la scienza non possiede ancora. Come si presenta l'universo nel suo insieme? Sappiamo che la Terra è il terzo a partire dal Sole di un sistema di nove pianeti, e che il Sole è una delle innumerevoli stelle (circa cento miliardi) che formano la nostra Galassia. Sappiamo che, a quanto si ricava dai più potenti telescopi, lo spazio è disseminato di altre galassie, galassie che a loro volta devono contarsi a miliardi. Continua così per sempre? C'è un'infinità di galassie? Oppure il cosmo ha grandezza finita? (Dovremo forse dire, « il nostro cosmo », perché se il nostro cosmo è finito, chi può dire che non ci siano altri cosmi finiti?).

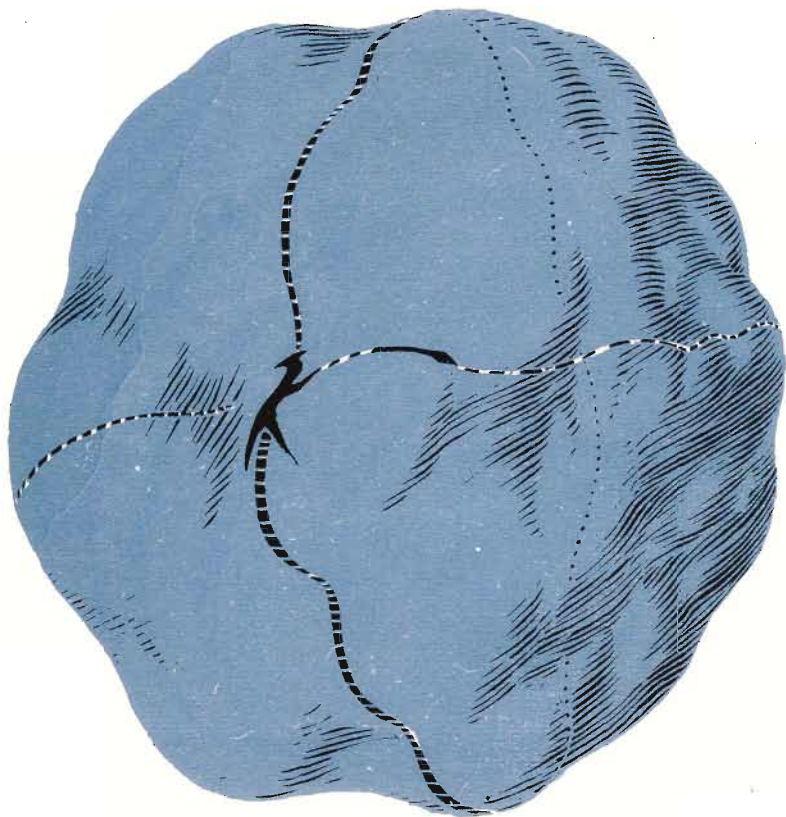
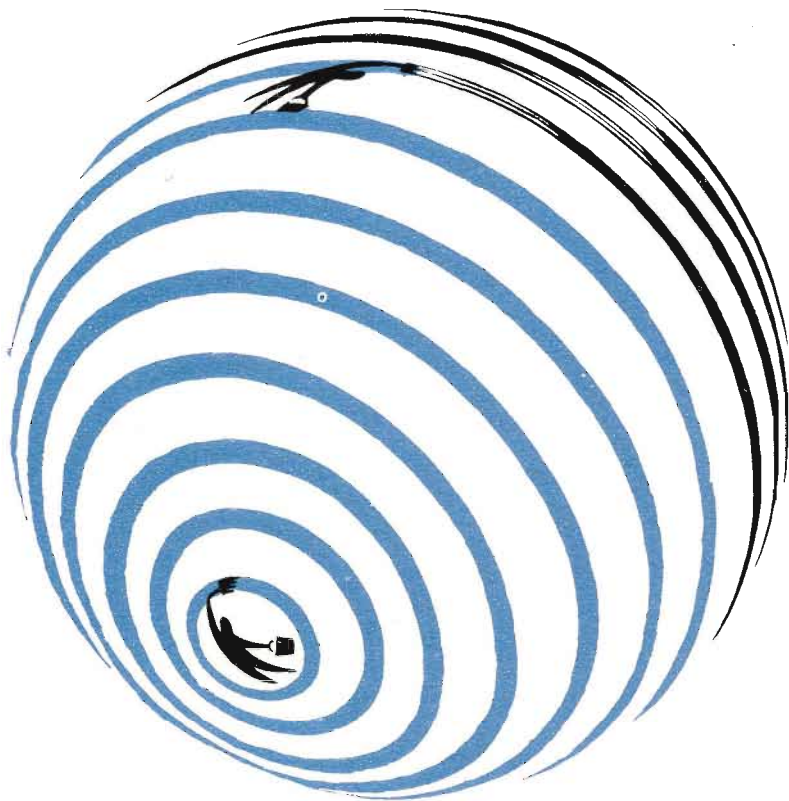
Gli astronomi si sforzano di rispondere come meglio possono a queste domande, costruendo i cosiddetti modelli dell'universo: quadri immaginari del cosmo quando è visto nella sua totalità. All'inizio del XIX secolo molti astronomi supposero che l'universo

si estendesse all'infinito, contenendo un'infinità di Soli. Lo spazio era euclideo. Le linee rette si estendevano all'infinito in tutte le direzioni. Se un cosmonauta si metteva in viaggio in una direzione qualsiasi e continuava in linea retta, avrebbe potuto procedere avanti in eterno senza raggiungere mai un termine. Questa, naturalmente, è una concezione che risale agli antichi Greci, i quali amavano dire che se un guerriero avesse continuato a scagliare la sua lancia sempre più lontano nello spazio, non avrebbe mai raggiunto un estremo; se questo estremo era immaginabile, niente impediva al guerriero di porvisi e scagliare la sua lancia ancora più in là!

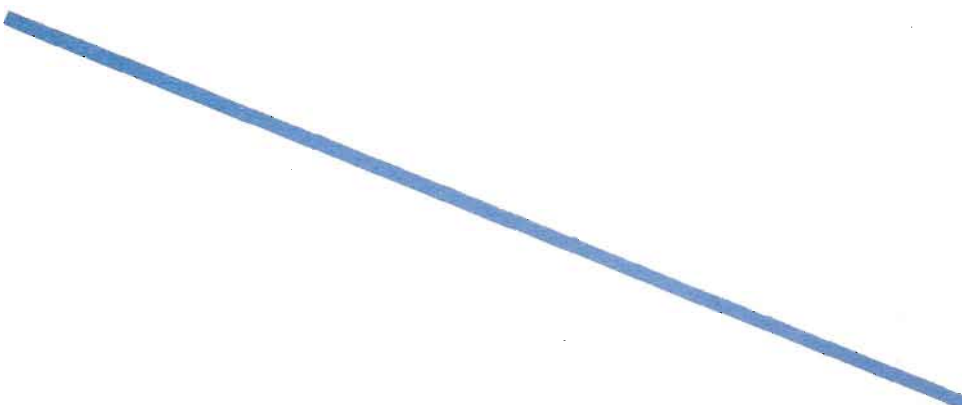
C'è un'importante obbiezione da muovere a questo punto di vista. Heinrich Olbers, un astronomo tedesco, fece osservare nel 1826 che se il numero dei Soli è infinito, e i Soli sono distribuiti a caso nello spazio, allora una qualsiasi retta condotta dalla Terra, in una direzione qualsiasi, finirebbe con l'incontrare una stella. Ne deriverebbe che l'intero cielo notturno dovrebbe essere una solida accecante distesa di luce stellare. È palese che non lo è. Si deve escogitare qualche spiegazione del buio cielo notturno per venire a capo di quello che va ora sotto il nome di paradosso di Olbers. La maggioranza degli astronomi della fine del XIX secolo e del principio del XX avanzarono l'ipotesi che il numero dei Soli sia finito. La nostra Galassia, sostennero, contiene tutti i Soli che esistono. E fuori della Galassia? Nulla! (Solo alla metà del secondo decennio di questo secolo si fece schiacciante l'evidenza che c'erano milioni di galassie situate ad enormi distanze dalla nostra). Altri astronomi suggerirono che la luce delle stelle lontane potesse rimanere intercettata da ammassi di nebbia interstellare.

La più ingegnosa di tutte le spiegazioni fu avanzata dal matematico svedese C. V. L. Charlier. Le galassie, secondo Charlier, sono raggruppate in ammassi; gli ammassi sono raggruppati in superammassi; i superammassi in super-superammassi, e così via all'infinito. Ad ogni passo verso un raggruppamento di ordine superiore le distanze fra i raggruppamenti crescono in proporzione alla grandezza dei gruppi. Se così fosse, allora più si prolunga una linea retta uscente dalla nostra Galassia, minore è la probabilità che essa incontri un'altra galassia. D'altra parte, la gerarchia degli ammassi è illimitata, e così si può ancora asserire che l'universo contiene un'infinità di stelle. Non c'è nulla di sbagliato nella spiegazione del paradosso di Olbers data da Charlier, salvo che ne esiste una più semplice. La daremo tra poco.

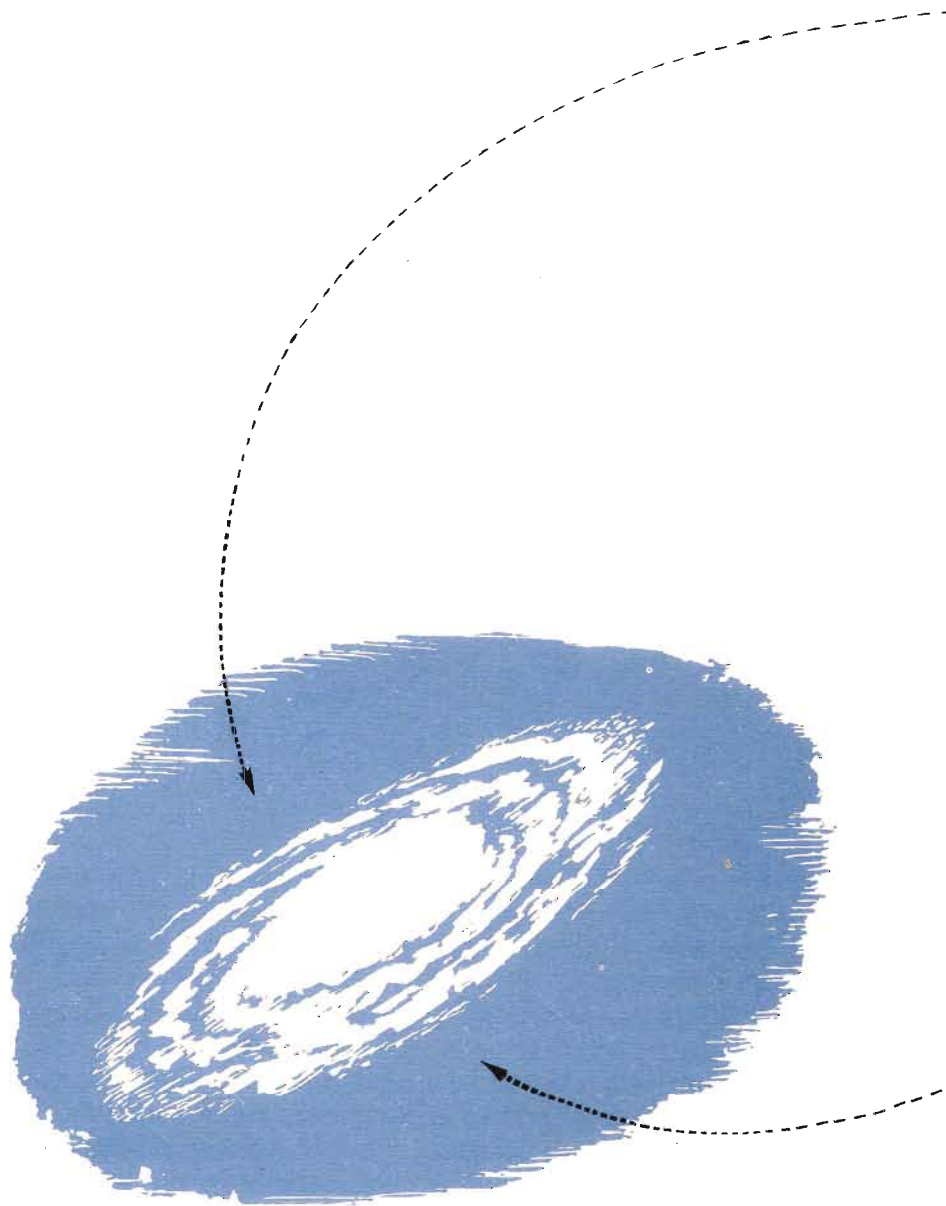
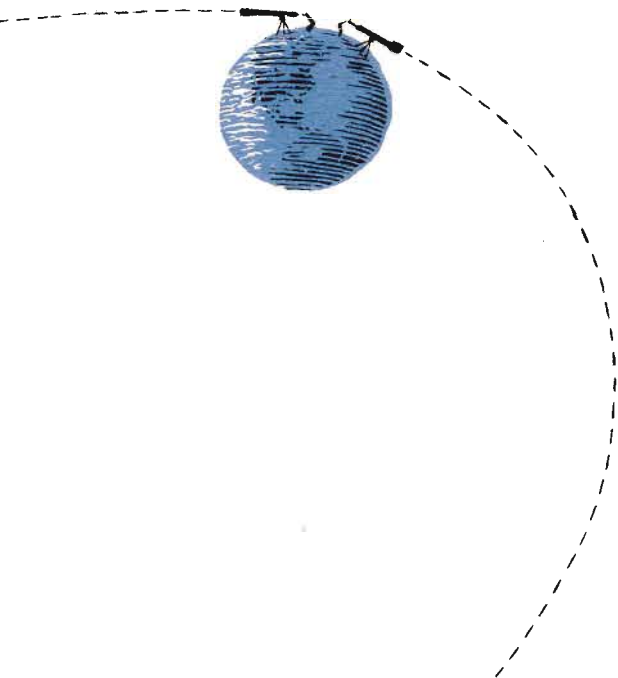
Il primo modello cosmico basato sulla teoria della relatività fu presentato dallo stesso Einstein in un articolo pubblicato nel

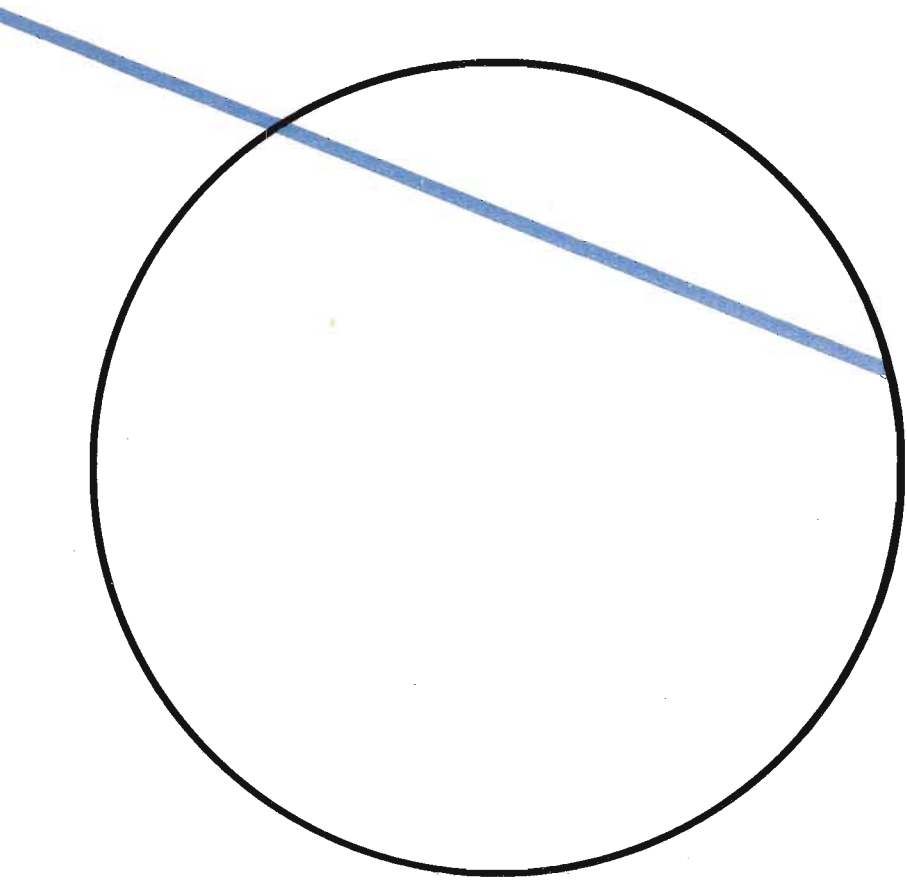
1917. Si trattava di un modello bello ed elegante, anche se Einstein dovette in seguito abbandonarlo. A pag. 97 abbiamo detto che i campi gravitazionali sono le deformazioni o le incurvature prodotte nella struttura dello spazio-tempo dalla presenza di grandi masse materiali. Entro ogni galassia, perciò, si ha abbondanza di questo torcersi e incurvarsi dello spazio-tempo. Ma nelle vaste estensioni di spazio vuoto tra le galassie? Una ipotesi sostiene che più lo spazio si estende lontano dalle galassie, più piano (più euclideo) diventa. Se l'universo fosse completamente vuoto di materia, sarebbe completamente piano, o forse non avrebbe senso attribuirgli una struttura. In ogni caso lo spazio-tempo si estende all'infinito in tutte le direzioni.

Einstein fece un'affascinante controproposta. Supponete, egli disse, che la quantità di materia nell'universo sia abbastanza grande da produrre una curvatura complessiva positiva. Lo spazio allora s'incurverebbe su se stesso in tutte le direzioni. Questo non lo si può capire completamente senza entrare nella geometria quadridimensionale non-euclidea, ma si può coglierne agevolmente il significato con l'aiuto di un modello a due dimensioni. Immaginate una Terra Piatta su cui vivano delle creature bidimensionali. Esse la considerano un piano euclideo esteso all'infinito in tutte le direzioni. È vero che gli astri di questa Terra Piatta provocano diverse protuberanze sul piano, ma si tratta di protuberanze localizzate che non influiscono sulla piattezza globale. C'è tuttavia un'altra possibilità che può presentarsi agli astronomi di Terra Piatta. Forse ogni protuberanza locale produce una leggera deformazione dell'intero piano, cosicché l'effetto complessivo di tutti gli astri è di incurvare il piano fino a farlo diventare la superficie di una sfera bernoccoluta. Un piano di questo genere sarebbe ancora illimitato nel senso che ci si potrebbe muovere in ogni direzione senza mai arrivare ad un termine. Un guerriero di Terra Piatta sarebbe ancora incapace di trovare un punto oltre il quale non è in grado di scagliare la lancia. Tuttavia la superficie sarebbe finita. Un viaggio prolungato abbastanza, lungo una « linea retta », riporterebbe alla fine il viaggiatore al punto di partenza.

I matematici dicono « chiusa » una superficie di questo tipo. È finita, ma illimitata. Come lo spazio infinito euclideo, il suo centro è ovunque, la sua circonferenza in nessun luogo. Questa « chiusura », proprietà topologica della figura, sarebbe facilmente verificabile da parte degli abitanti di Terra Piatta. Una verifica è stata accennata: andare intorno alla sfera in tutte le direzioni. Un'altra prova sarebbe dipingerne la superficie. Se un abitante di Terra Piatta partisse da un punto e dipingesse dei cerchi concentrici sempre più grandi, finirebbe col dipingersi dentro a un punto dal lato opposto della sfera. Se la sfera, però, fosse grande

e gli abitanti fossero confinati in una piccola porzione della sua superficie, non sarebbero in grado di fare simili verifiche topologiche.

Secondo Einstein, il nostro spazio è la « superficie » tridimensionale di una vasta ipersfera (sfera a quattro dimensioni). Il tempo, nel modello einsteiniano, rimane non curvo: una coordinata rettilinea che si estende all'infinito nel passato e nel futuro. Se il modello lo si immagina come una struttura dello spazio-tempo quadridimensionale, è più simile ad un ipercilindro che ad una ipersfera. E per questo motivo viene di solito

chiamato l'« universo cilindrico ». In ogni istante del tempo vediamo lo spazio come una specie di sezione trasversale tridimensionale dell'ipercilindro. Ogni sezione trasversale è la superficie di un'ipersfera.

La nostra Galassia occupa soltanto una minuscola porzione di questa superficie, e così non ci è ancora dato di compiere un esperimento topologico che ne dimostri la « chiusura ». Un telescopio sufficientemente potente potrebbe essere puntato su una certa galassia in una direzione, e poi sul *rovescio* della stessa galassia puntandolo in direzione opposta. Se ci fossero delle astro-

navi capaci di raggiungere velocità prossime a quella della luce, riuscirebbero a girare intorno al cosmo viaggiando in una direzione qualsiasi nella linea più retta possibile. Non si è in grado di « dipingere » letteralmente il cosmo, ma in sostanza sarebbe la stessa cosa farne delle carte geografiche, con delle successive mappe sferiche sempre più grandi. Se il cartografo continuasse abbastanza a lungo, potrebbe capitargli di superare un punto oltre il quale si troverebbe *dentro* alla sfera di cui sta tracciando la carta. E questa sfera diverrebbe sempre più piccola via via che egli fa nuove carte geografiche, come il cerchio che diminuisce quando un abitante di Terra Piatta finisce col dipingersi entro un punto.

In un certo qual modo, il modello non-euclideo di Einstein è più semplice del modello classico in cui lo spazio è piano. È più semplice nello stesso senso in cui si può dire che un circolo è più semplice di una linea retta. Una linea retta si prolunga all'infinito in entrambi i versi, e l'infinito in matematica è un argomento assai complicato. Un cerchio è finito in modo confortante. Non ha estremi, nessuno ha bisogno di preoccuparsi su quel che gli succede all'infinito. Parimenti, nel lindo universo di Einstein nessuno ha bisogno di preoccuparsi di che cosa succede in tutte le direzioni all'infinito, cioè, per usare un'espressione cara ai cosmologhi, delle « condizioni al contorno ». Non ci sono problemi al contorno nel raccolto universo di Einstein, perché non c'è contorno.

Altri modelli cosmici, tutti coerenti con la relatività generale, furono proposti e discussi negli anni tra il venti e il trenta. Taluni hanno proprietà ancora più strane di quelle dell'universo cilindrico di Einstein. L'astronomo olandese Willem de Sitter escogitò un altro modello chiuso, finito, ma in questo modello il tempo si incurva al pari dello spazio. Più si guarda lontano attraverso lo spazio di de Sitter, e più gli orologi sembrano battere lentamente. Se si guarda lontano abbastanza si arriva ad una regione in cui il tempo si ferma completamente, « come il ricevimento del Cappellaio Pazzo », dice Eddington, « dove sono sempre le sei ».

« Non che ci sia una frontiera », spiega Bertrand Russell nell'*ABC della Relatività.* « La gente che vive nella regione che il nostro osservatore ritiene la terra del loto, vive una vita altrettanto convulsa della sua, ma dà l'impressione di essere eternamente ferma. In realtà, non ci si renderebbe mai conto dell'esistenza di una terra del loto, perché è necessario un tempo infinito perché la luce proveniente da colà possa raggiungerci. Potremmo magari venire a conoscenza di regioni proprio al limite di essa, ma la regione stessa rimarrebbe sempre appena oltre la nostra percezione ». Naturalmente, a dirigersi verso questa regione a bordo di un'astronave, tenendola costantemente sotto controllo con un telescopio, si vedrebbe il ritmo del suo tempo aumentare lentamente man mano che ci si avvicina. Una volta arrivati, tutto si muoverebbe a ritmo normale. La terra del loto sarebbe situata ora oltre il confine di un nuovo orizzonte.

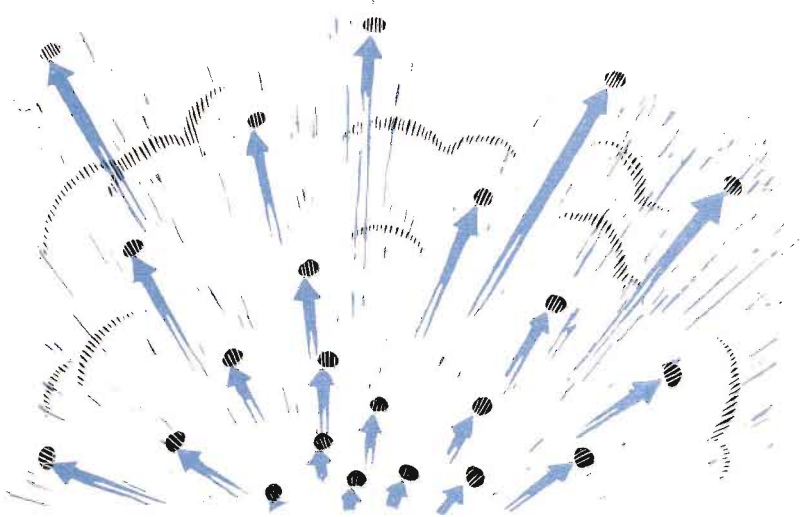
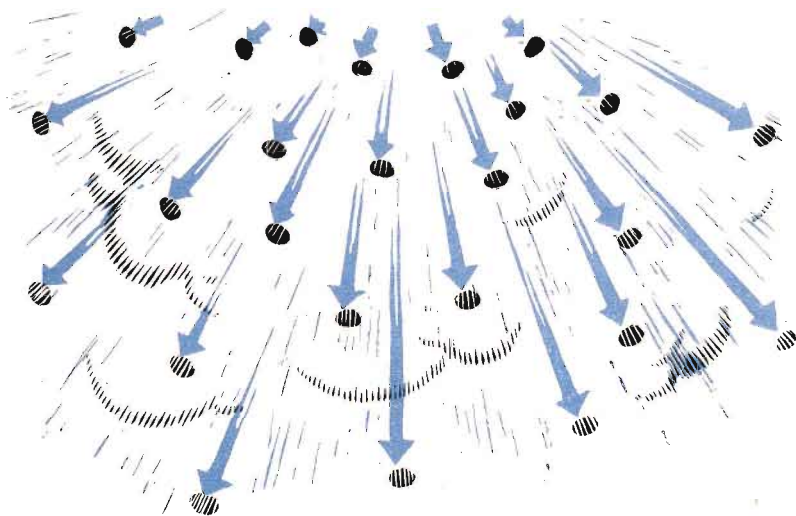
Avete mai notato che quando un aeroplano ci sfreccia sul capo a bassa quota il suono dei suoi motori cala un po' di tono quando passa sopra di noi? Questo fenomeno ha preso il nome di « effetto Doppler », da Christian Johann Doppler, il fisico austriaco che lo scoprì alla metà del XIX secolo. È un effetto presto spiegato. Mentre l'aeroplano si avvicina, la sua velocità fa sì che le vibrazioni del suono dei suoi motori colpiscano i timpani con una frequenza maggiore che se l'aeroplano fosse fermo. In tal modo il suono si fa più acuto. Quando l'aeroplano si allontana, le vibrazioni colpiscono le orecchie con una frequenza minore: il tono si abbassa.

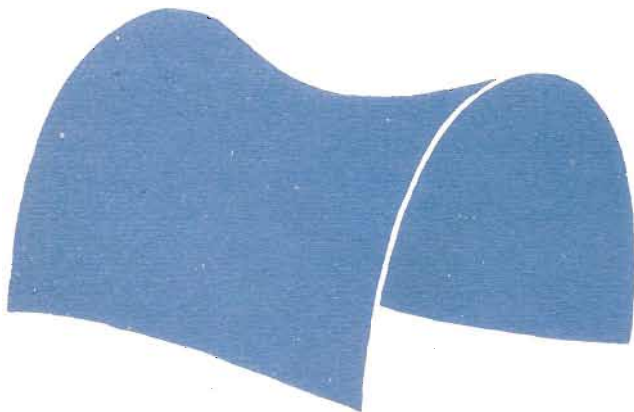
Avviene esattamente lo stesso quando una sorgente luminosa si muove rapidamente verso di voi, o si allontana. La cosa non ha nulla a che vedere con la velocità della luce (che è sempre costante), ma riguarda le lunghezze d'onda della luce. Se voi e una sorgente luminosa vi trovate in moto relativo di avvicinamento, l'effetto Doppler accorcia la lunghezza d'onda della luce, spostandone lo spettro verso l'estremità violetta. Se voi e la sorgente luminosa siete in moto di allontanamento, l'effetto Doppler provoca un analogo spostamento dello spettro verso l'estremità rossa.

George Gamow, in una delle sue conferenze, raccontò un episodio (certamente inventato) che implica l'effetto Doppler, e che è troppo bello per essere trascurato. Sembra che Robert W. Wood, famoso fisico americano della John Hopkins University, fosse sorpreso a Baltimora mentre passava col semaforo rosso. Quando comparve davanti al giudice, Wood con una brillante esposizione dell'effetto Doppler, spiegò come il suo moto verso la luce rossa ne avesse spostato il colore verso l'estremità violetta dello spettro, facendogliela apparire verde. Il giudice si disponeva a rinunciare all'ammenda, ma per l'appunto uno degli studenti di Wood (che Wood aveva recentemente bocciato) era presente. Egli precisò la velocità che sarebbe stata richiesta per spostare la luce dal rosso al verde. Il giudice lasciò cadere l'accusa originaria, e multò Wood per eccesso di velocità.

Doppler ritenne che l'effetto da lui scoperto spiegasse il colore apparente delle stelle lontane: le stelle rosse si troverebbero in moto di allontanamento dalla Terra, le azzurre in moto di avvicinamento. Il che non risultò giusto (i colori sono dovuti ad altre cause), ma nel 1920 si scoprì che la luce proveniente dalle lontane galassie mostra un deciso spostamento verso il rosso, pienamente giustificabile solo supponendo che le galassie si muovano allontanandosi dalla Terra. Inoltre, lo spostamento aumenta, in generale, in proporzione alla distanza della galassia dalla Terra. Se la galassia A dista dalla Terra il doppio della galassia B, lo spostamento verso il rosso della luce di A tende ad essere il doppio dello spostamento di B. Secondo l'astronomo inglese Fred Hoyle, lo spostamento al rosso dell'ammasso galattico dell'Idra sta ad indicare che l'ammasso si allontana dalla Terra alla velocità fantastica di più di 61.000 chilometri al secondo.

Vari tentativi sono stati fatti di giustificare lo spostamento verso il rosso senza attribuirlo all'effetto Doppler. Uno di questi, la teoria della « luce stanca », dice semplicemente che più a lungo viaggia la luce, più vibra lentamente. Questo è un perfetto esempio di ipotesi *ad hoc*, perché non c'è alcun'altra prova ad avvalorarla. Secondo altri lo spostamento deriva dal passaggio della luce attraverso il pulviscolo cosmico. Il modello di de Sitter spiega elegantemente lo spostamento in termini di un tempo curvo. Ma la spiegazione più semplice, che meglio si adatta agli altri fatti noti, è che lo spostamento verso il rosso indichi un effettivo movimento delle galassie. Presto tutta una nuova serie di modelli di « universo in espansione » si sviluppò in base a questa supposizione.

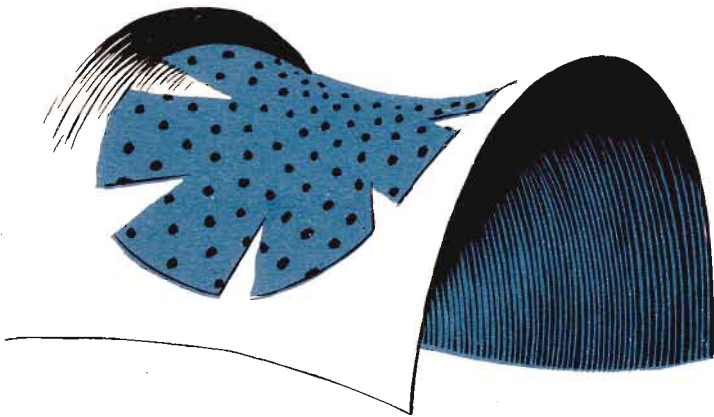
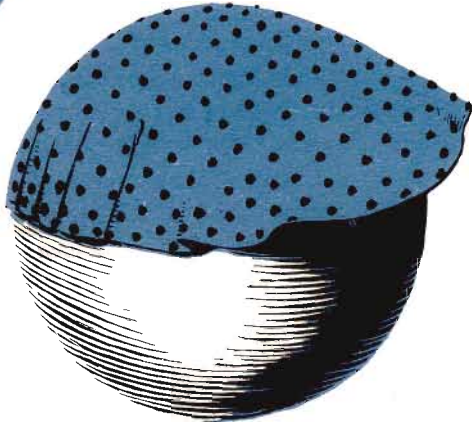
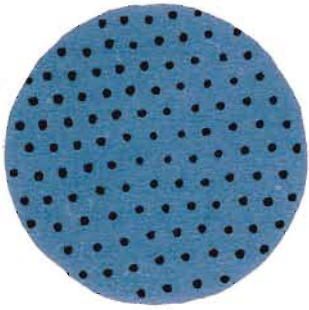
È importante capire che questa espansione non significa che le galassie stesse si espandano, e nemmeno (sembra ora chiaro) che si espandano gli spazi tra le galassie di un ammasso galattico. L'espansione pare implichi gli spazi tra gli ammassi. Immaginate una grande massa di pasta in cui siano conficcate a caso centinaia di uvette. Ogni uvetta rappresenta un ammasso di galassie. Se mettiamo la pasta nel forno in modo che lieviti uniformemente in tutte le direzioni, le uvette mantengono la stessa

grandezza, ma lo spazio tra le uvette diventa più grande. Nessuna uvetta può essere considerata il centro di questa espansione. Dal punto di vista di ogni singola uvetta, tutte le altre sembrano allontanarsi. Più distante è l'uvetta, più velocemente sembra allontanarsi.

Il modello einsteiniano dell'universo è statico. E questo, naturalmente, perché Einstein lo sviluppò prima che gli astronomi decidessero che l'universo era in espansione. Per impedire alle forze gravitazionali di attirare il suo cosmo tutto insieme e di schiacciarlo, egli dovette postulare l'esistenza di un'altra forza (che chiamò la « costante cosmologica ») che esplica un'azione repulsiva e tiene le stelle a distanza fra di loro. Calcoli successivi dimostrarono che il modello di Einstein è instabile come una moneta in bilico sul bordo. Il minimo urto la farebbe cadere su testa o croce, testa per un universo in espansione, croce per un universo che si schiaccia. La scoperta dello spostamento verso il rosso indusse a scartare l'universo in contrazione, e i cosmologhi volsero la loro attenzione ai modelli in espansione.

Si costruirono modelli in espansione di ogni tipo. Al russo Alexander Friedmann e all'abate belga Georges Lemaître si devono i due più famosi. Alcuni di questi modelli adottano uno spazio chiuso (curvatura positiva), altri uno spazio aperto (curvatura negativa), altri lasciano in sospeso la questione se lo spazio sia aperto o chiuso. Eddington escogitò un modello e ci scrisse sopra un libro di piacevole lettura, *The Expanding Universe* [L'universo in espansione]. Il suo modello è essenzialmente come quello einsteiniano: è chiuso come la superficie di un immenso pallone quadrimensionale e si espande in modo uniforme in tutte e tre le dimensioni spaziali. Gli astronomi, oggi, dubitano che lo spazio si richiuda su se stesso. La densità della materia nello spazio non sembra sufficiente a giustificare una complessiva curvatura positiva. Gli astronomi preferiscono un universo aperto o infinito di curvatura complessiva negativa, come la superficie di una sella.

Il lettore non deve pensare che se la superficie di una sfera ha curvatura positiva, la sua faccia *interna* abbia curvatura negativa. La curvatura della superficie sferica è positiva, da qualunque faccia la si guardi. La curvatura negativa di una superficie a sella deriva dal fatto che in ogni punto la superficie si incurva in due modi differenti. È concava a passarci la mano sopra procedendo dal davanti al dietro, convessa a passarci la mano sopra da un fianco all'altro. Una delle due curvature è espressa da un numero positivo, l'altra da un numero negativo. Per ottenere la curvatura della superficie in un dato punto si devono moltiplicare i due numeri fra loro. Se in tutti i punti il prodotto è negativo, come lo è certamente se in ogni punto la superficie si incurva in due modi diversi, si dice che la superficie ha curvatura negativa. La superficie che circonda il buco di una ciambella (toro) costituisce un altro esempio familiare di superficie a curvatura negativa. Superfici di questo tipo costituiscono, naturalmente, soltanto dei rozzi modelli di spazio tridimensionale a curvatura negativa.

Telescopi più potenti decideranno forse la questione se l'universo abbia curvatura positiva, negativa o nulla. Un telescopio può vedere soltanto le galassie che si trovano entro un certo volume sferico. Se le galassie sono distribuite a caso, e se lo

spazio fosse euclideo (curvatura nulla), il numero delle galassie interne a tale sfera sarebbe sempre proporzionale al cubo del raggio della sfera. In altre parole, se si costruisse un telescopio capace di vedere nello spazio fino ad una distanza doppia di ogni telescopio precedente, il numero delle galassie visibili dovrebbe saltare da n a $8n$. Se il salto fosse minore, vorrebbe dire che l'universo ha una curvatura positiva; se fosse maggiore, che la curvatura è negativa.

Dovrebbe essere il contrario — si potrebbe pensare —, ma consideriamo il caso di superfici bidimensionali a curvatura positiva e negativa. Supponiamo di avere un cerchio ritagliato da un foglio di gomma piano, su cui siano appiccicate delle uvette a distanza di mezzo centimetro una dall'altra. Per dargli la forma di una superficie sferica, bisogna *comprimere* la gomma e molte uvette verranno portate più vicine. In altre parole, se le uvette devono rimanere distanti mezzo centimetro una dall'altra anche sulla superficie sferica, un *minor numero* di uvette è necessario. Il contrario avviene se deformiamo il disco di gomma in una superficie a sella. Questa operazione tende la gomma e allontana fra loro le uvette; per mantenerle alla distanza di mezzo centimetro, è necessario un *maggior numero* di uvette. La morale è, così dice una vecchia barzelletta matematica, che non dovete scordarvi di dire al commesso, quando comperate una bottiglia di birra, che volete una bottiglia a spazio interno curvato negativamente, e non positivamente!

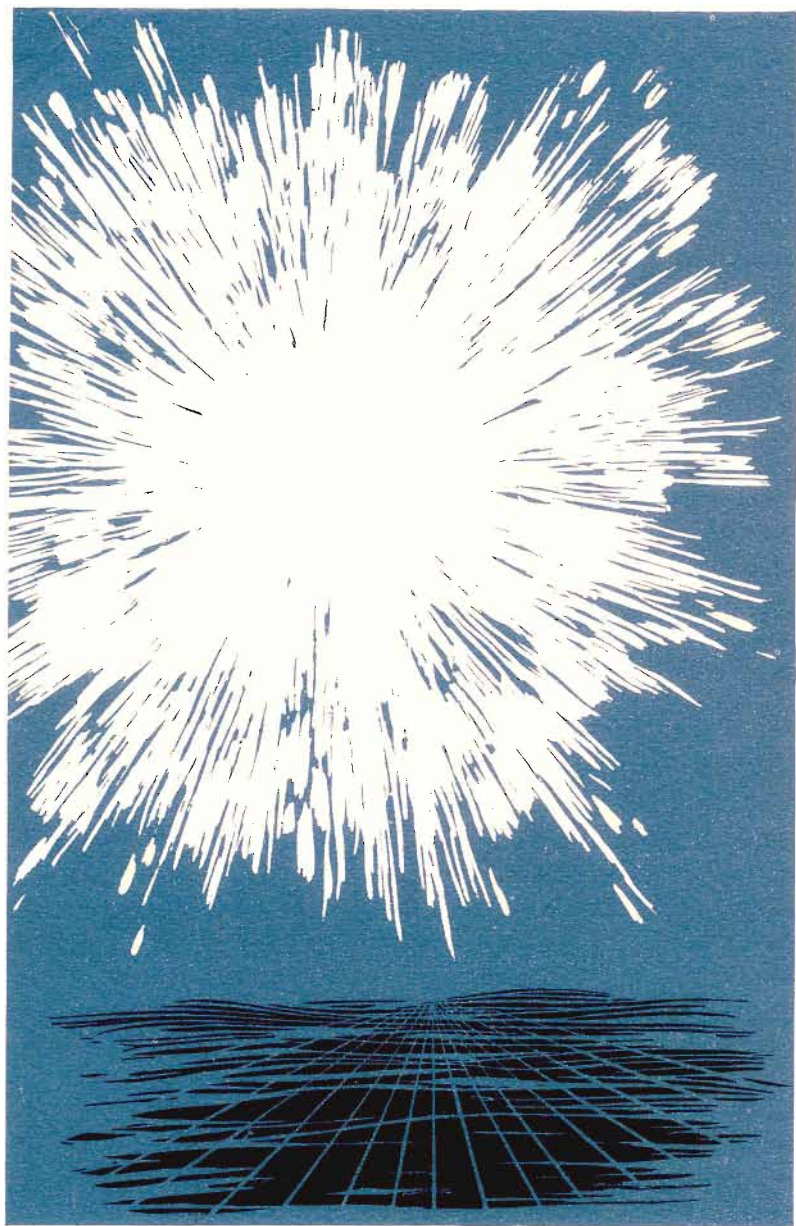
I modelli di universo in espansione resero superflua la costante cosmologica di Einstein, l'ipotetica forza che impedisce alle stelle di riunirsi. (Einstein considerò in seguito la costante cosmologica il più grande errore da lui commesso). I nuovi modelli risolsero anche immediatamente il problema del paradosso di Olbers circa la luminosità del cielo notturno. Il modello statico einsteiniano era stato di scarsa utilità in proposito. È vero, è un modello con un numero finito di Soli, ma a causa del carattere chiuso del suo spazio, la luce emessa da questi Soli è costretta a girare perpetuamente intorno all'universo, torcendosi variamente a seconda di come la flettono le deformazioni locali

dello spazio-tempo. Questo illuminerebbe il cielo esattamente come una infinità di Soli, a meno di non voler supporre un cosmo così giovane che la luce abbia potuto compiere soltanto un numero limitato di giri.

Il concetto di un universo in espansione elimina elementarmente il paradosso. Se le remote galassie si allontanano dalla Terra con una velocità proporzionale alla loro distanza, l'effetto che ne risulta è una diminuzione della quantità complessiva di luce che raggiunge la Terra. Se una galassia è abbastanza distante, la sua velocità supererà quella della luce; la sua luce non ci giungerà mai. Oggi molti astronomi credono seriamente che, se l'universo non fosse in espansione, non ci sarebbe assolutamente differenza tra la notte e il giorno.

Il fatto che le lontane galassie possano superare la velocità della luce relativamente alla Terra sembra violare il principio che

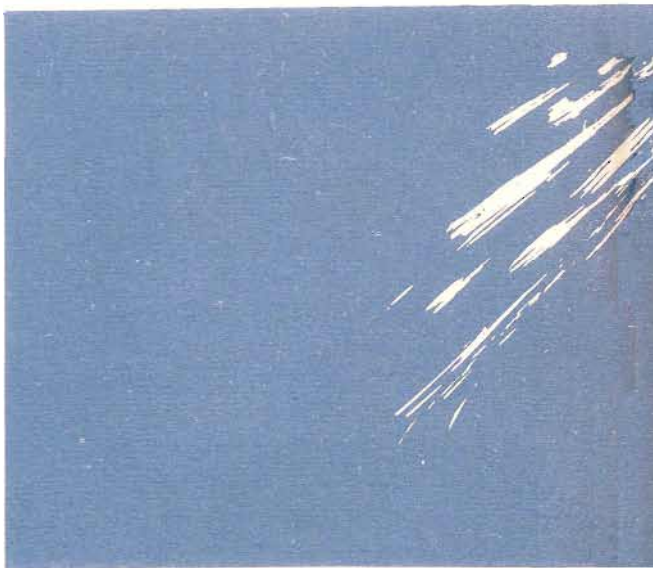
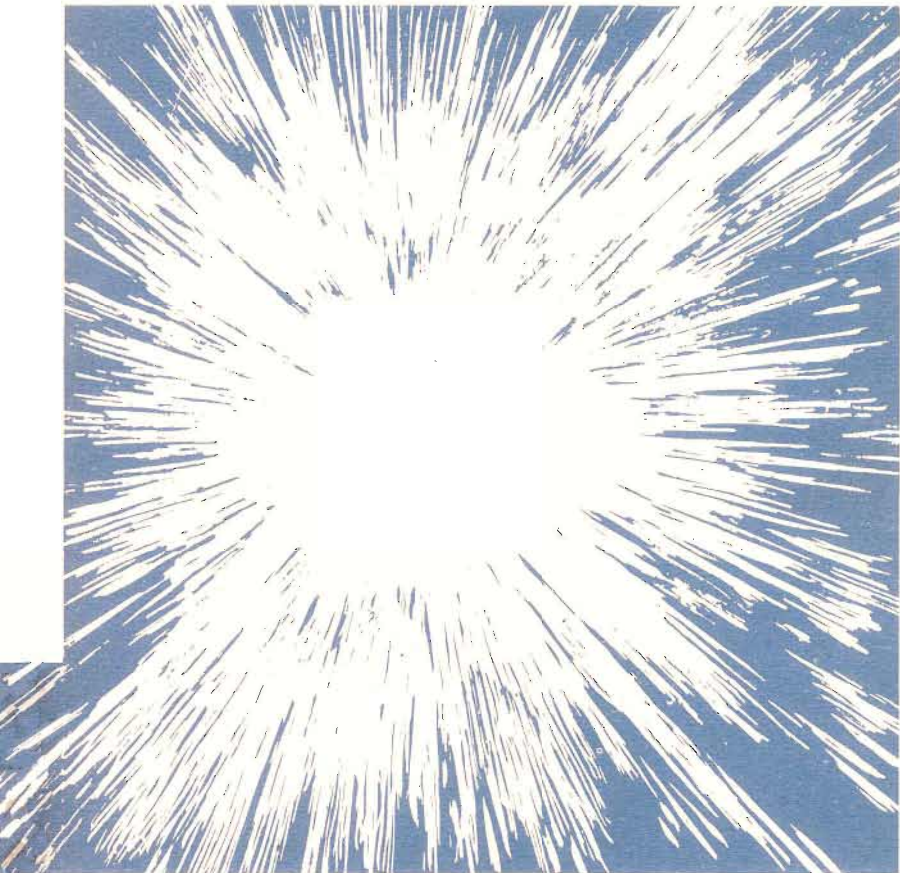
nessun corpo materiale può muoversi più velocemente della luce. Ma come abbiamo notato nel capitolo 4, il principio vale solo per le condizioni che soddisfano ai requisiti della teoria della relatività ristretta. Nella teoria generale, il principio deve prendere la nuova forma secondo cui nessun segnale è in grado di essere trasmesso con velocità maggiore di quella della luce. Tuttavia sussiste un'accesa controversia circa l'effettiva possibilità delle lontane galassie di varcare la barriera della luce, per così dire, e di dileguarsi per sempre dalla capacità dell'uomo di vederle, anche qualora abbia a disposizione i più potenti telescopi immaginabili. Alcuni esperti pensano che qui la velocità della luce *sia* un limite; le più lontane galassie diventerebbero sempre meno luminose senza mai divenire totalmente invisibili, purché l'uomo abbia strumenti abbastanza potenti per scorgerle.

Le vecchie galassie, fu detto un tempo da qualcuno, non muoiono mai. Svaniscono solamente. È importante capire, però, che nessuna galassia svanisce effettivamente nel senso che la sua materia scompare dall'universo. Esse raggiungono semplicemente una velocità che rende impossibile, o quasi impossibile, per i telescopi terrestri di rilevarle. La galassia che svanisce continua, naturalmente, ad essere visibile a tutte le galassie che la circondano più da vicino. Per ogni galassia esiste un « orizzonte ottico », una barriera sferica, oltre la quale i suoi telescopi non penetrano. Questi orizzonti sferici non sono gli stessi per due qualsiasi galassie. Gli astronomi calcolano che il punto in cui le galassie possono svanire oltre il *nostro* margine si trova ad una distanza circa doppia di quella raggiunta da un telescopio di oggi. Se questa ipotesi è giusta, è ora visibile circa un ottavo di tutte le galassia che si potranno mai vedere.

Se l'universo è in espansione (non ha importanza se sia piano, aperto o chiuso), si affaccia un interrogativo affascinante. Come era l'universo riandando indietro nel tempo fin dove è concesso? Ci sono due modi sostanzialmente diversi di rispondere, ciascuno dei quali è la pietra angolare di un noto modello contemporaneo dell'universo. Esamineremo entrambi i modelli nel prossimo capitolo.

Grande esplosione o stato stazionario?

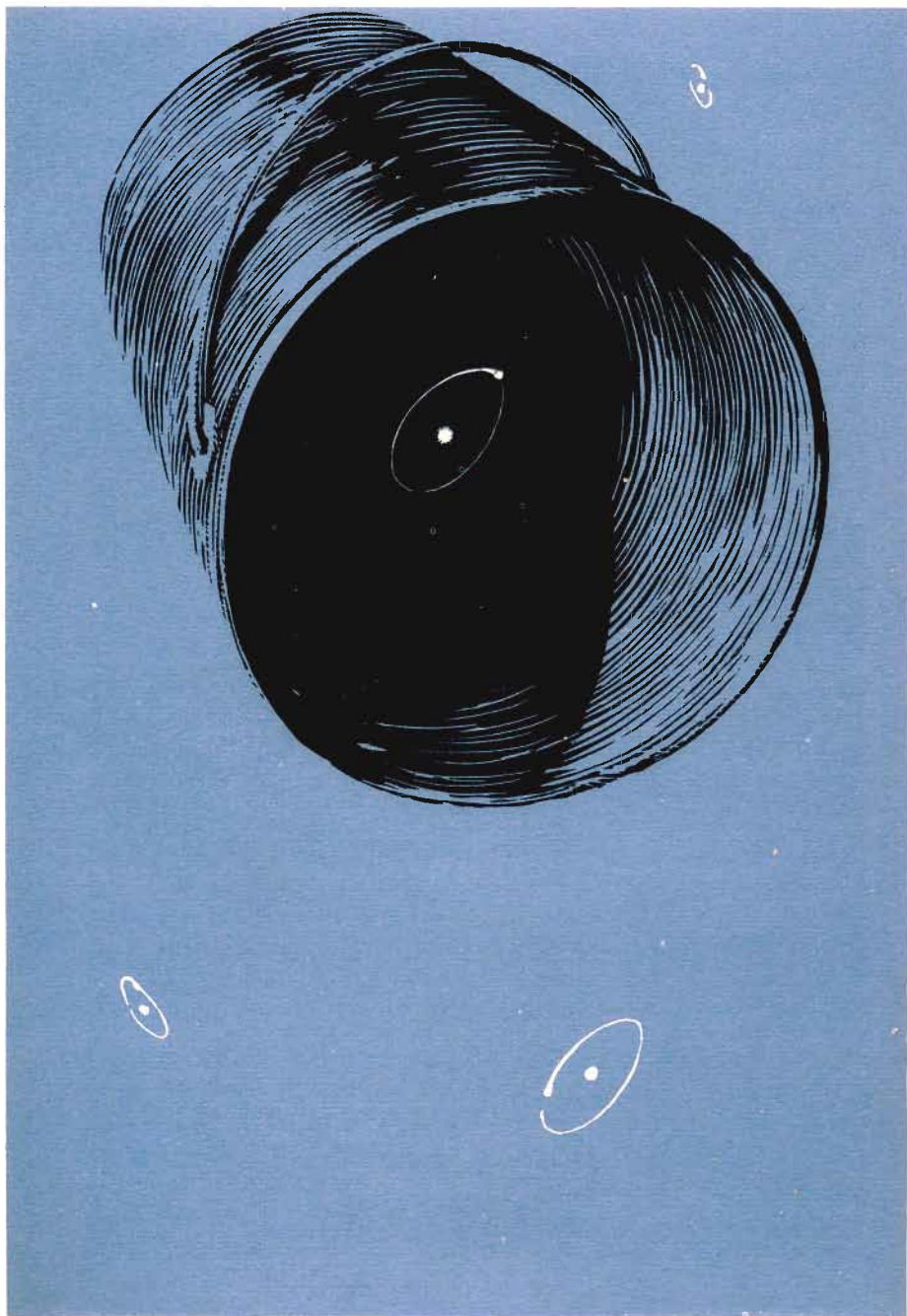
Provate a immaginarvi un cosmo in espansione, e poi fate girare la scena in senso inverso, come un film mandato all'indietro. Appare evidente che ci deve essere stato un momento, in quello che Shakespeare chiamò « l'oscuro abisso del tempo passato », in cui un'enorme quantità di materia era concentrata in uno spazio piccolissimo. Forse una grande esplosione primordiale, molti miliardi di anni fa, diede inizio all'intero processo. Questa è l'ipotesi della Grande Esplosione, sostenuta per la prima volta da Lemaître (pag. 150) e che ha adesso il suo miglior paladino in George Gamow, il fisico di origine russa il cui nome è già comparso diverse volte in questo libro.

Gamow ha scritto un libro convincente, *The Creation of the*

Universe [La creazione dell'universo] a sostegno della sua teoria. Lemaître pensava che la Grande Esplosione avesse avuto luogo circa cinque miliardi di anni fa, ma l'espansione, negli ultimi anni, si è verificata anche per le stime dell'età dell'universo; si propende oggi per i 20 o 25 miliardi di anni. Comunque, secondo Gamow, un tempo tutta la materia dell'universo era concentrata in un globo uniforme, incredibilmente denso di materia concentrata, chiamato Ylem (dall'antico termine greco ὕλη per indicare la materia primordiale). Come si era costituito l'Ylem? Gamow ritiene che in precedenza la materia fosse sparsa attraverso lo spazio in un universo *in contrazione*. Su questo periodo della Grande Compressione, ovviamente, non saremo mai in grado di apprendere nulla. Come il modello di Lemaître, il modello di Gamow inizia in realtà con un'Esplosione. È ciò che chiamiamo « il momento della creazione »: non nel senso — sono le parole di Gamow — che dal nulla vien fatto qualcosa, ma nel senso che vien data forma a qualcosa che non l'ha. Se si preferisce credere in una creazione dal nulla, *questo* è un punto quanto mai adatto, nella teoria di Gamow, per individuarla.

Appena prima della Grande Esplosione, la temperatura e la pressione dell'Ylem erano incredibilmente alte. Poi si verificò l'esplosione, mostruosa, inimmaginabile. Nel libro di Gamow si troveranno tutti i particolari di quel che può essere accaduto dopo. Alla fine, dalla polvere e dal gas in espansione si coagularono le stelle. L'attuale espansione dell'universo è la continuazione del moto impresso alla materia dall'esplosione iniziale. Gamow crede che questo moto non cesserà mai più.

Attualmente, il maggior rivale della Grande Esplosione di Gamow è l'universo in Stato Stazionario. Si tratta di un'ipotesi affacciata nel 1948 da tre scienziati dell'Università di Cambridge: Hermann Bondi, Thomas Gold e Fred Hoyle. La difesa più convincente di tale ipotesi è il libro divulgativo di Hoyle, *The Nature of the Universe* [La natura dell'universo]. Come la teoria di Gamow, quella dello Stato Stazionario accetta l'espansione dell'universo e suppone lo spazio aperto ed infinito, piuttosto che chiuso come nel modello di Eddington. Ma, contrariamente alla teoria di Gamow, non comincia con un'esplosione. Anzi, non c'è affatto un principio. Non per nulla il titolo del libro di Hoyle differisce da quello di Gamow per una sola parola. Il cosmo di Hoyle non ha alcun momento di « creazione »; o meglio, come vedremo, ha una infinità di piccole creazioni. Per rifarmi direttamente a Hoyle: « Ogni ammasso di galassie, ogni stella, ogni atomo ha avuto un inizio, ma non nell'universo stesso. L'universo è qualcosa di più delle sue parti, una conclusione forse inaspettata » [1].

L'universo in Stato Stazionario è sempre in corsa, proprio come adesso. Andando indietro un centinaio di migliaia di miliardi di anni, si trovano gli stessi tipi di galassie in evoluzione in ogni porzione del cosmo, contenenti lo stesso tipo di stelle in via di invecchiamento, alcune con gli stessi tipi di pianeti che girano loro intorno, e su alcuni di questi pianeti, forse, tipi di vita simili. Ci può esser un'infinità di pianeti su cui, proprio in questo momento (qualunque cosa ciò possa significare), creature intelligenti stanno mandando i loro primi astronauti nello spazio. Il cosmo è uniforme, nel complesso, attraverso uno spazio infinito ed un tempo infinito. La sua espansione non è la conseguenza di un'esplosione. È dovuta ad una fondamentale forza repulsiva di qualche tipo, la natura della quale è ancora accanitamente discussa. Questa forza è analoga alla ormai abbandonata costante cosmologica einsteiniana. Spinge le galassie

[1] Fred Hoyle, *Frontiers of Astronomy*, New York, New American Library paperback ed., p. 284.

lontano l'una dall'altra, sintanto che svaniscono alla fine oltre il margine quando varcano la barriera della luce. È una scomparsa che avviene, naturalmente, dal punto di vista di un osservatore nella nostra Galassia. Quando un osservatore sulla Terra vede svanire la galassia X e le sue vicine, gli osservatori nella galassia X vedono la *nostra Galassia* fare lo stesso.

Resta una domanda importantissima. Se l'universo è sempre stato in espansione e si manterrà in espansione per sempre, perché non si dirada? Evidentemente non c'è modo di sostenere lo Stato Stazionario senza supporre che venga costantemente creata nuova materia, forse sotto forma di idrogeno, il più semplice degli elementi. Secondo Hoyle, basterebbe che nascesse ogni 10 milioni di anni un solo atomo di idrogeno per ogni secchio di spazio, per mantenere il cosmo stazionario. Naturalmente, il ritmo a cui si forma la materia deve essere esattamente tale da controbilanciare il processo di diradamento.

Ma da dove vengono gli atomi di idrogeno? Nessuno pretende di saperlo. Qui comincia la teoria di Hoyle. Se si conserva la

fede in una creazione dal nulla, questo è il punto della teoria dello Stato Stazionario dove ha luogo la creazione, o meglio, dove essa costantemente ha luogo.

Le due teorie rivali, quella della Grande Esplosione e quella dello Stato Stazionario, possono entrambe venir adattate in modo da accordarsi con tutti i fatti noti riguardanti il cosmo (o, per essere esatti, con quelli che *al momento si pensa* siano i fatti noti), come pure con i princìpi della relatività. Attualmente le due teorie procedono fianco a fianco. Ogni anno qualche nuova osservazione conferma la teoria della Grande Esplosione e getta l'ombra del dubbio sullo Stato Stazionario, ogni anno c'è la contropartita di nuove osservazioni che avvalorano lo Stato Stazionario gettando l'ombra del dubbio sulla Grande Esplosione. Se vi capita di leggere un articolo o un libro di uno dei paladini di ciascuna teoria, vedrete che l'autore scrive come se le prove fossero tutte dalla sua parte e ben poche dalla parte dei suoi ostinati, retrogradi oppositori. Non è il caso di credergli. Dove gli esperti non sono d'accordo, è prudente non prendere una posizione, a meno di non avere una forte preferenza emotiva per una teoria piuttosto che per un'altra. Gamow ha scritto francamente sulla sua preferenza emotiva per la Grande Esplosione, Hoyle è stato altrettanto franco a proposito della propria preferenza emotiva per uno Stato Stazionario. (Per quel che ne so,

gli psicanalisti non hanno ancora spiegato le due teorie in base alle neurosi degli uomini che le sostengono, ma certamente alla fine ci arriveranno). Prescindendo da ogni inclinazione emotiva, è bene tenere in sospeso il giudizio fino a che gli astronomi non siano in grado di presentare prove sufficienti a far pendere la bilancia da una parte o dall'altra.

Esistono molti altri modelli cosmici, taluni proposti seriamente, altri per giuoco. Ci sono modelli in cui lo spazio si torce all'indietro come nella striscia di Moebius (una superficie ad una sola faccia, ottenuta dando un mezzo giro ad una striscia di carta e unendo gli estremi). Se fate un viaggio intorno ad un universo di questo tipo vi ritrovate nel punto da cui siete partiti, soltanto che tutto è rovesciato come in uno specchio. Naturalmente, potete fare un altro giro completo e raddrizzare di nuovo tutto. Vi sono modelli in pulsazione che alternano Grandi Esplosioni con periodi di espansione e di contrazione. Il ciclo si ripete indefinitamente; come nelle dottrine dell'eterna ricorrenza di certi filosofi e nelle religioni orientali. (Particolare curioso: Edgard Allan Poe propose un universo in pulsazione, attualmente nella sua fase di schiacciamento, in una strana opera cosmologica chiamata *Eureka*, da lui tenuta in gran conto). Il modello della « relatività cinematica » dovuto all'astronomo dell'Università di Oxford, Edward A. Milne, è forse il più bizzarro di tutti. Questo modello introduce due tipi di tempo essenzialmente diversi. Nei termini dell'uno, l'universo è infinito per età e per grandezza, nei termini dell'altro ha grandezza finita ed ha cominciato ad espandersi dal momento della creazione. È questione di comodità prendere come base uno o l'altro di questi due tempi.

Il matematico inglese Edmund Whittaker propose una volta (per scherzo) una teoria dell'universo in diminuzione in cui un cosmo finito non solo si contrae, ma mentre si contrae si dilegua continuamente ritornando da dove viene nella teoria di Hoyle. Il mondo alla fine svanisce completamente, non con un'esplosione ma con un lamento. « Il che avrebbe il vantaggio », scrive Whittaker, « di fornire un semplicissimo quadro del destino ultimo dell'universo ». Naturalmente una teoria simile dovrebbe

spiegare perché osserviamo una tendenza galattica al rosso invece di una tendenza al violetto; ma non è difficile fornire una ragione. Non abbiamo che da prendere a prestito uno degli espedienti di de Sitter e supporre che il tempo si stia facendo più veloce. (Un amico, Sidney Margulies, ha messo in rilievo come si riuscirebbe così a spiegare perché più si invecchia e più gli anni sembrano scorrer via come mesi. Essi scorrono *veramente* via come mesi!) La luce che giunge alla Terra da una lontana galassia sarebbe quindi la luce della galassia come appariva milioni di anni fa, quando la luce vibrava più lentamente. Ciò potrebbe produrre uno spostamento verso il rosso abbastanza grande da superare lo spostamento verso il violetto dovuto all'effetto Doppler. Naturalmente, più lontana è la galassia, più vecchia è la luce e più rossa apparirebbe.

Il fatto che si possa costruire un modello in contrazione mostra quanto siano duttili le equazioni della relatività: sono adattabili ad una quantità di modelli cosmici diversi, ciascuno dei quali spiega abbastanza bene quanto può essere osservato attualmente. È interessante scoprire che il filosofo inglese Francesco Bacone scriveva nel suo *Novum Organum* nel 1620: « Riguardo ai cieli si possono formulare molte ipotesi in sé differenti, e tuttavia in sufficiente accordo con i fenomeni ». Sotto questo aspetto la cosmologia moderna non è cambiata, sebbene la quantità di fenomeni osservata sia molto maggiore; ci sono quindi buone ragioni per supporre che i modelli moderni siano più vicini alla verità di quelli antichi. È naturale che i modelli cosmici di moda fra un centinaio d'anni, basati su dati astronomici attualmente sconosciuti, possano differire violentemente da qualsiasi modello preso oggi sul serio.

Proprio con un pensiero così umiliante nella mente, tanti scrittori di cosmologia moderna, da Eddington a Sciama, hanno citato questo brano del Libro VIII del *Paradiso Perduto* di Milton. L'angelo Raffaele sta parlando ad Adamo ed Eva. Osservate come viene postulata la relatività del moto della Terra:

Del dimandare e del voler sapere / Biasimo non t'appongo, poi che il cielo / È un libro aperto innanzi a te da Dio, / Onde le meraviglie tu vi legga / Del-

l'opre sue e apprenda le stagioni / Ch'Ei fece e l'ore, i giorni, i mesi, e gli anni, / Per saper ciò, se dritto tu ragioni, / Importa poco che muovasi il cielo, / Ovver la terra. All'Angelo ed all'uomo / Il supremo Architetto l'altro ascose; / Né volle divulgar gli arcani suoi / Per non esporli allo scrutinio d'altri, / Il cui dovere è d'ammirare. E se essi / Non pertanto arguir vogliono, lascia / Che indaghino la fabbrica de' cieli / E ne facciano a lor dispute tema; / Forse, perché sorriderà di tante / Sottili opinïon che andranno fuori / Del giusto segno, allor che, modellando / A posta loro il ciel, calcoleranno / Minutamente gli astri e i moti loro.

(Trad. italiana di Alessandro Muccioli, La Nuova Italia, Firenze 1933).

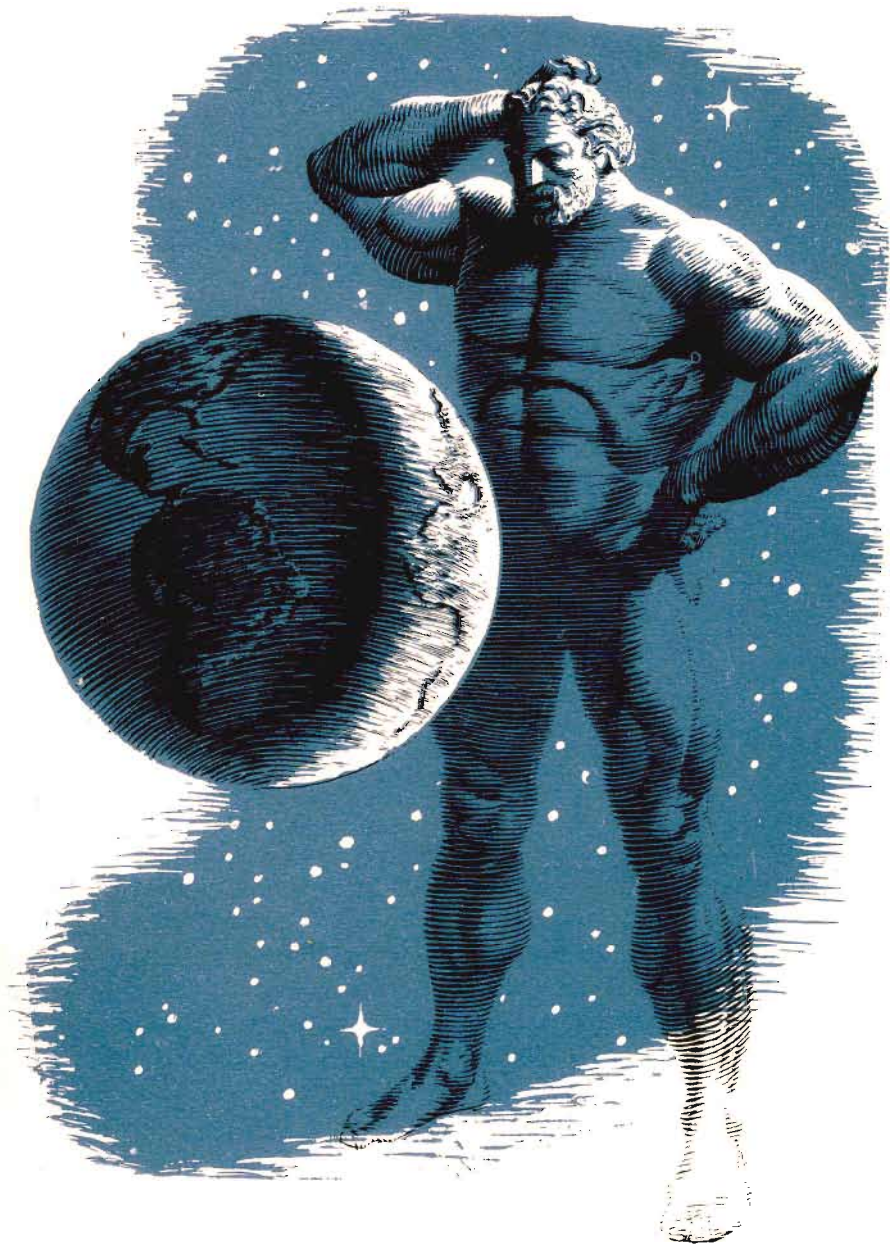
In un divertente racconto dello scrittore irlandese Lord Dunsany (nel libro *The Man Who Ate the Phoenix* [L'uomo che mangiò la fenice]), Atlante spiega a Dunsany quello che si era verificato il giorno in cui la scienza aveva reso ormai impossibile ai mortali di credere nell'antico modello greco dell'universo. Atlante ammette che aveva trovato sciocco e spiacevole il proprio compito. Aveva freddo perché il Polo Sud della Terra gli posava sul collo, e aveva sempre le mani bagnate per via dei due oceani. Ma era rimasto al suo posto finché la gente credeva in lui.

Poi il mondo, dice tristemente Atlante, cominciò a farsi « troppo scientifico ». Egli aveva deciso allora che non c'era più bisogno di lui; aveva deposto il mondo e se ne era andato.

« Proprio così », dice Atlante. « Non senza aver riflettuto, non senza aver molto riflettuto. Ma quando lo feci, devo dire che rimasi profondamente stupito di quanto capitò ».

« E che cosa capitò? ».

« Semplicemente nulla. Semplicemente proprio nulla ».

In questo libro ho cercato di raccontare la storia di quello che è accaduto in una più recente occasione, quando il Dio newtoniano del moto assoluto, dietro incitamento di Einstein, ha messo giù la Terra e se ne è andato. Non è accaduto gran che alla Terra, almeno per un certo periodo. Ha continuato a ruotare attorno al proprio asse, a rigonfiarsi all'equatore, a girare attorno al Sole. Ma qualcosa è accaduto alla fisica. Il suo potere di spiegare, il suo potere di predire, soprattutto il suo potere di mutare la faccia della Terra sia per il bene che per il male, è divenuto più grande di quanto non sia mai stato prima.

Glossario

L'intento di questo glossario è di dare delle definizioni semplici ed intuitivamente chiare, entro i limiti di un libro elementare, piuttosto che delle definizioni tecnicamente precise. Una spiegazione completa di « curvatura », ad esempio, sarebbe impossibile; richiederebbe intere pagine. Il lettore che desideri definizioni più tecniche e particolareggiate potrà consultare una enciclopedia o un libro di testo adatti.

Accelerazione: Un mutamento nella velocità, nella direzione, o in entrambe, di un corpo in moto.
Accelerazione negativa: Diminuzione della velocità.
Antimateria: Materia formata da antiparticelle.

Antiparticella: Una particella elementare uguale ad una particella ordinaria, salvo che ha carica e/o momento magnetico opposti. Nelle particelle cariche entrambe le cose sono opposte. Nelle particelle neutre che non hanno carica la distinzione è basata sull'inversione del momento magnetico.

c: Simbolo convenzionale della velocità della luce: 300.000 chilometri al secondo.

Caduta libera: Moto nello spazio di un corpo soggetto unicamente alla forza di gravità.

Conservazione della massa-energia: La teoria che la quantità totale della massa-energia nell'universo non può né crescere né diminuire.

Contrazione di Lorentz-FitzGerald: La contrazione relativistica di un corpo nella direzione secondo la quale si muove.

Coordinata: Uno di un insieme di numeri usati per localizzare un punto. Su una linea è necessaria una coordinata; su un piano due coordinate; nello spazio, tre coordinate; nello spazio-tempo, quattro coordinate.

Cosmo: L'intero universo spazio-temporale. Talvolta viene chiamato metagalassia.

Curvatura: Deviazione dal « retto » o « piatto » di una linea, una superficie, uno spazio.

Effetto Doppler: Mutamenti nell'apparente lunghezza d'onda del suono o di una radiazione elettromagnetica, dovuti al moto relativo di avvicinamento o di allontanamento tra osservatore e sorgente dell'onda.

Energia: Capacità di compiere un lavoro.

Esperienza ideale: Esperimento che può essere compiuto solo nella mente, e non effettuato praticamente.

Esperimento di Michelson-Morley: Famoso esperimento che prova l'assenza di un vento d'etere mentre la Terra muove attraverso lo spazio.

Esperimento Kennedy-Thorndike: Una ripresa dell'esperimento Michelson-Morley, con un'apparecchiatura a braccia di differente lunghezza.

Etere: Sostanza che i fisici del XIX secolo credevano permeasse

tutto lo spazio, servendo da mezzo di propagazione delle radiazioni elettromagnetiche.

Forza centrifuga: Forza di inerzia che spinge un corpo, o parti di un corpo, ad allontanarsi dal centro di rotazione.

g: Accelerazione (prodotta dalla gravità o dall'inerzia) di 9,8 metri al secondo per secondo.

g nulla: Gravità zero, la condizione di assenza di peso che si ha nello spazio molto lontano dalla materia o in una cosmonave in stato di caduta libera.

Galassia: Complesso di miliardi di stelle, spesso a forma lenticolare, che muove come un tutto unico attraverso allo spazio.

Geodetica: La linea « più retta » tra due punti su una superficie data, o in un dato spazio o spazio-tempo; la linea di lunghezza estrema (la più lunga o la più breve) che unisce due punti.

Geometria ellittica: Geometria non-euclidea nella quale, su un piano, da un punto fuori di una retta, non si può tirare alcune retta parallela alla retta data.

Geometria euclidea: Geometria basata sui postulati di Euclide.

Geometria iperbolica: Geometria nella quale, su un piano, per un punto fuori di una retta passano infinite rette parallele alla retta data.

Geometria non-euclidea: Geometria in cui uno o più dei postulati di Euclide sono sostituiti da altri.

Gravità: Secondo Newton la forza di attrazione tra due corpi qualsiasi, direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente al quadrato della loro mutua distanza. Secondo Einstein, la tendenza dei corpi materiali, non soggetti ad altre forze, a muoversi attraverso lo spazio-tempo secondo delle geodetiche.

Inerzia: La tendenza della materia a perserverare nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme relativamente ad un sistema inerziale, quando non è soggetta ad una forza esterna.

Intervallo nello spazio-tempo: La distanza fra due eventi misurata nello spazio-tempo.

Ipersfera: Una sfera quadridimensionale.

Ipotesi « ad hoc »: Una teoria elaborata per spiegare una serie di osservazioni, ma non sostenuta affatto da altre osservazioni.

Linea evolutiva: Il percorso di un corpo in moto, quando se ne tracci il grafico in un sistema di coordinate quadrimensionali spazio-tempo.

Luce: La porzione visibile dello spettro elettromagnetico.

Lunghezza d'onda: La distanza, misurata nella direzione in cui l'onda si muove, da un punto dell'onda al più vicino punto che in quell'istante si trovi nella stessa fase.

Massa: Grossomodo, la quantità di materia che costituisce un corpo.

Massa a riposo: La massa di un corpo in quiete relativamente all'osservatore.

Massa gravitazionale: La massa di un corpo visto come il generatore di un campo gravitazionale o come soggetto ad un campo gravitazionale. Sulla Terra è misurata dal peso dell'oggetto.

Massa inerte o inerziale: La massa di un corpo considerata come la sua resistenza ad un'alterazione del moto. È misurata dalla forza richiesta per far aumentare di una data quantità l'accelerazione del corpo.

Massa negativa: Proprietà ipotetica di un corpo che, se esistesse, lo farebbe muovere in senso opposto alla direzione di una forza ad esso applicata.

Moto assoluto: Moto relativo ad un etere fisso, o a qualunque sistema privilegiato di riferimento altrettanto universale.

Onda elettromagnetica: Radiazione prodotta dall'oscillazione di una carica elettrica. Si propaga attraverso lo spazio vuoto con velocità costante rispetto ad un osservatore in moto uniforme, indipendentemente dalla velocità della sorgente che la emette o dalla velocità dell'osservatore.

Orizzonte ottico: Il confine sferico (in un universo in espansione) che può essere raggiunto dai telescopi, non importa quanto potenti, perché al di là di questo limite le galassie si allonta-

nerebbero dall'osservatore con velocità uguale o superiore a quella della luce.

Paradosso dei gemelli: Il principio del paradosso dell'orologio applicato ad un'ipotetica coppia di gemelli. Un gemello parte per un viaggio spaziale ad alta velocità; relativamente al sistema inerziale della Terra il suo processo di invecchiamento risulta rallentato, ed egli fa ritorno a terra più giovane del gemello rimasto a casa.

Paradosso dell'orologio: La sorprendente asserzione della teoria della relatività che due orologi sincronizzati possono essere separati e poi riportati insieme in modo tale che gli orologi non risultino più sincronizzati, pur tenendo entrambi perfettamente il tempo.

Paradosso di Olbers: Sorprendente calcolo secondo cui l'intero cielo dovrebbe essere costantemente più luminoso del Sole, purché le galassie fossero uniformemente distribuite nello spazio, l'universo fosse infinito nel tempo e nello spazio, e non fosse in espansione.

Postulato: Assunto, senza prove, che fa parte del fondamento di un sistema logico.

Principio di equivalenza: L'affermazione, fondamentale nella teoria della relatività generale, che gravità ed inerzia sono due diversi modi di considerare essenzialmente lo stesso fenomeno.

Principio di Mach: La teoria secondo cui l'inerzia deriva dal moto accelerato di un corpo rispetto a tutta la materia del cosmo.

Quarta dimensione: Qualsiasi quarta coordinata in un sistema di coordinate. Nella teoria della relatività, il tempo è considerato convenzionalmente come la quarta dimensione.

Segnale: Ogni catena di causa-effetto che passa da un corpo ad un altro.

Sistema di riferimento: Sistema di coordinate considerato come fisso, e rispetto al quale sono effettuate le misure di tempo, moto, lunghezza, massa, eccetera.

Sistema galileiano: Vedi *sistema inerziale*.

Sistema inerziale: Un sistema di coordinate in moto di traslazione uniforme attraverso allo spazio, relativamente a tutti gli altri sistemi inerziali. Lo stesso che sistema galileiano.

Spazio euclideo: Spazio con curvatura nulla.

Spazio-tempo, o Cronotopo: Il sistema di coordinate quadridimensionale della relatività.

Spettro elettromagnetico: Tutta la gamma della radiazione elettromagnetica, dalle onde di lunghezza estremamente grande alle onde di lunghezza estremamente piccola.

Spostamento verso il rosso: Uno spostamento verso il rosso nella lunghezza d'onda della luce. Questo spostamento può essere dovuto: 1. Al moto relativo di allontanamento della sorgente dall'osservatore; 2. All'azione di un campo gravitazionale intenso; 3. All'origine della luce, in un periodo più antico, se si suppone che il tempo diventi più veloce.

Struttura dello spazio-tempo: La struttura geometrica dello spazio-tempo.

Teoria del campo unificato: Teoria, sviluppata per ora in modo non soddisfacente, nella quale gravità ed elettromagnetismo sono unificate da un comune sistema di equazioni.

Teoria della Grande Esplosione: La teoria secondo cui l'universo ha avuto origine da una mostruosa esplosione primordiale dell'Ylem.

Teoria della relatività generale: La seconda teoria della relatività di Einstein, che ne generalizza la teoria ristretta fino ad includervi il moto accelerato, la gravità e l'inerzia.

Teoria della relatività ristretta: La prima teoria einsteiniana della relatività, concernente soltanto osservatori in sistemi inerziali.

Universo in pulsazione: Un universo che si espande e si contrae alternativamente.

Teoria dello stato stazionario: La teoria secondo cui il cosmo non ha principio né fine nel tempo, ma conserva su larga scala uno « stato stazionario » mentre nuova materia è creata costantemente per sostituire la materia che si dirada con l'espandersi dell'universo.

Topologia: Grossomodo, lo studio delle proprietà che restano invariate quando una figura subisce delle deformazioni continue.

Vento d'etere: Moto dell'etere rispetto ad un corpo che viaggia attraverso ad esso.

Ylem: La sostanza primordiale che si suppone sia esplosa miliardi di anni fa, dando origine all'attuale universo in espansione.

Cronologia

1879 Il 14 marzo, nasce ad Ulm in Germania Albert Einstein.

1881 Primo tentativo di Albert Michelson di scoprire il vento d'etere.

1887 L'esperimento Michelson-Morley non riesce a rivelare il vento d'etere.

1893 H. A. Lorentz pubblica la sua prima teoria della contrazione per spiegare la prova di Michelson-Morley.

1905 Einstein pubblica la sua teoria della relatività ristretta.

1908 Roland von Eötvös porta a compimento con straordinaria precisione un esperimento dimostrante che la massa inerte è proporzionale alla massa gravitazionale.
Hermann Minkowski tiene la conferenza che diverrà fa-

mosa sullo spazio e il tempo come mere « ombre » di uno spazio-tempo fondamentale.

1911 Einstein suggerisce che si verifichi durante un'eclissi di Sole la flessione dei raggi luminosi.

1916 Einstein completa la sua opera sulla teoria della relatività generale.

1917 Einstein descrive il suo modello di « universo cilindrico ». Ha inizio la cosmologia moderna.

1919 Arthur Stanley Eddington guida una spedizione in Africa per osservare un'eclissi di Sole; le misure confermano l'effetto della gravità sui raggi di luce previsto da Einstein.

1932 L'esperimento Kennedy-Thorndike ripete la prova di Michelson-Morley in modo tale da smentire l'originale teoria lorentziana della contrazione.

1942 Enrico Fermi e i suoi colleghi portano a termine la prima reazione nucleare a catena prolungata. La massa si trasforma in energia in accordo con la formula di Einstein. Inizia l'era atomica.

1955 Morte di Einstein a Princeton, nel New Jersey, il 18 Aprile.

1958 Rudolf Mössbauer scopre l'« effetto Mössbauer », che permette in breve esperimenti destinati a confermare la previsione di Einstein secondo la quale il ritmo del tempo viene rallentato dalla gravità.

Bibliografia

Opere di grande divulgazione sulla relatività

Barnett, Lincoln, *L'universo e Einstein,* Milano, Bompiani, 1953.

Borel, Emile, *Space and Time,* London and Glasgow, Blackie and Son, Ltd., 1926.

Coleman, James A., *La relatività è facile,* Milano, Feltrinelli, 1960.

Durell, Clement V., *Readable Relativity,* London, G. Bell and Sons, Ltd., 1926.

Eddington, Sir Arthur S., *Space, Time and Gravitation,* Cambridge, The University Press, 1920.

Einstein, Albert e Infeld, Leopold, *L'evoluzione della fisica,* Torino, Einaudi, 1948.

Frank, Philipp, *Relativity, A. Richer Truth*, Boston, Beacom Press, 1950.

Gamow, George, *Gravity*, Garden City, L. I., Doubleday & Company, Inc., 1962.

Infeld, Leopold, *Albert Einstein*, Torino, Einaudi, 1960.

Jaffe, Bernard, *Michelson and the Speed of Light*, Garden City, L. I., Doubleday & Company, Inc., 1960.

Landau, L. D. and Rumer, G. S., *What is Relativity?*, New York, Basic Books, Inc., 1960.

Lieber, Lillian, *The Einstein Theory of Relativity*, New York, Toronto, Farrar, Straus & Cudahy, Inc., 1945.

Reichenbach, Hans, *From Copernicus to Einstein*, New York, Philosophical Library, Inc., 1942.

Opere di media difficoltà sulla relatività

D'Abro, A., *The Evolution of Scientific Thought from Newton to Einstein*, New York, Boni & Liveright, Inc., 1927.

Einstein, Albert, *Sulla teoria speciale e generale delle relatività*, Bologna, Zanichelli, 1921.

Einstein, Albert, *Sidelights on Relativity*, New York, E. P. Dutton & Co., Inc., 1923.

Jammer, Max, *Storia del concetto di spazio*, Milano, Feltrinelli, 1959.

Reichenbach, Hans, *The Philosophy of Space and Time*, New York, Dover Publications, 1958.

Schilpp, Paul A. (ed.), *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, Torino, Boringhieri, 1958.

Whittaker, Sir Edmund, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, New York, Philosophical Library, 1954.

Opere per specialisti sulla relatività

Bergmann, P. G., *Introduction to the Theory of Relativity*, New York, Prentice-Hall, Inc., 1942.

Eddington, Sir Arthur S., *The Mathematical Theory of Relativity*, Cambridge, The University Press, 1923.
Einstein, Albert and others, *The Principle of Relativity*, Calcutta, The University of Calcutta, 1920.
Einstein, Albert, *Il significato della relatività*, Torino, Einaudi, 1950.
McCrea, W. H., *Relativity Physics*, London, Methuen & Co., Ltd., 1935.
Milne, E. A., *Relativity, Gravity, and World Structure*, New York, Oxford University Press, 1935.
Möller, Christian, *The Theory of Relativity*, Oxford, The Clarendon Press, 1935.
Pauli, Wolfgang, *Teoria della relatività*, Torino, Boringhieri, 1958.
Rainich, George, *Mathematics of Relativity*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1950.
Schrödinger, Erwin, *Space-Time Structure*, Cambridge, The University Press, 1950.
Synge, John Lighton, *Relativity: the Special Theory. Relativity: the General Theory*, New York, Interscience Publishers, Inc., Vol. 1, 1956; Vol. 2, 1960.
Tolman, Richard C., *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*, New York, Oxford University Press, 1934.
Weyl, Hermann, *Space, Time and Matter*, London, Methuen & Co., Ltd., 1922.

Articoli divulgativi sulla relatività

Cohen, I. Bernard, *An Interview with Einstein*, « Scientific American » (July, 1955).
De Benedetti, Sergio, *The Mössbauer Effect*, « Scientific American » (March, 1960).
Dicke, R. H., *The Eötvös Experiment*, « Scientific American » (December, 1961).
Grünbaum, Adolf, *Logical and Philosophical Foundations of the Special Theory of Relativity*, in A. Danto and S. Morgen-

besser, *Philosophy of Science*, New York, Meridian Press, 1960.

Reichenback Hans, *Il significato filosofico della teoria della relatività in Albert Einstein,* in *Modern Philosophy of Science,* London, Routledge and Kegan, 1959.

Rothman, Milton A., *Things that Go Faster than Light,* « Scientific American » (July, 1960).

Teller, Edward, *The Geometry of Space and Time,* « The Mathematics Teacher » (November, 1961).

Russel Bertrand, *L'a. b. c. della relatività*, Milano, Longanesi, 1960.

Opere di grande divulgazione sulla moderna cosmologia

Bondi, Hermann, *The Universe at Large*, Gargen City, L. I., Doubleday & Company, Inc., 1960.

Eddington, Sir Arthur S., *L'universo in espansione*, Bologna, Zanichelli, 1934.

Gamow, George, *The Creation of the Universe,* New York, The Viking Press, Inc., 1952.

Hoyle, Fred, *The Nature of the Universe,* New York, Harper and Brothers, 1950.

Munitz, Milton K., *Theories of the Universe*, New York, Free Press of Glencoe, Inc., 1957.

Sciama, Dennis, *The Unity of the Universe*, Garden City, L. I., Doubleday & Company, Inc., 1959.

Whitrow, G. J., *The Structure and Evolution of the Universe,* New York, Harper and Brothers, 1959.

Opere di media difficoltà sulla moderna cosmologia

Bondi, Hermann, *Cosmology*, Cambridge, The University Press, 1952.

Johnson, Martin, *Time, Knowledge, and the Nebulae,* New York, Dover Publications, 1947.

Kapp, Reginald O., *Towards a Unified Cosmology,* New York, Basic Books, Inc., 1960.

Indice analitico

ABC della Relatività, L', 118, 146

Accelerazione, 36, 71-72, 74, 78-79, 80, 84, 85, 93, 109, 110, 112, 113, 123, 124
Ad hoc, 28, 29, 148
Andromeda, 120
Antimateria, 68, 106
Antiparticelle, 68, 106
Aristotele, 77. 83, 118
Assoluti, 95

Bacone, Francesco, 167
Bergson, Henri, 122
Berkeley, Bishop, 111
Blamont, J. E., 103
Bondi, Hermann, 160

Campo di forza, 109
Campo gravitazionale, 77, 80-84, 98, 101, 104, 105, 124, 125-127, 138
Campo metrico, 108
Campo unificato, teoria del, 102
Carnap, Rudolf, 117
Carroll, Lewis, 31
Case School of Applied Science (Case Institute), 21
Caso Plattner, Il, 11
Cassirer, Ernst, 117
Charlier, C. V. L., 137
Columbia University, 25
Condizioni al contorno, 144

Conservazione della massa-energia, 66
Contorcimento all'indietro dello spazio, teoria del, 166
Contrazione, teoria della, 27-31, 47, 56, 60
Coordinate cartesiane, sistema di, 60
Coriolis, effetto di, 110 nota
Coriolis, forza di, 110
Coriolis, G. G., 110 nota, 111
Costante cosmologica, 150, 152, 160
Creazione dell'Universo, La, 158
Curvatura costante, 90
Curvatura negativa, 150-152
Curvatura positiva, 89-90, 138, 150-152

D'Abro, A., 111, 112
De Sitter, Willem, 144, 148, 167
Dicke, Robert H., 102
Dingle, Herbert, 122, 123, 124, 125, 127
Direzione, 8-9
Doppler, Christian Johann, 146, 147, 148, 167, 172
Dunsany, Lord, 168

Eclissi di Sole, 103-105
Eddington, Arthur Stanley, 53, 105, 106, 110, 111, 117, 126, 144, 150, 160, 167, 180
Effetto Doppler, 146-148
Effetto Mössbauer, 29, 126-127
Einstein, Albert, VIII, 1, 11, 94, 96, 168
e Bergson, 122
e la costante cosmologica, 152, 160
e Lorentz, 27
modello dell'universo, di, 138, 140, 150
e il paradosso dei gemelli, 118, 122
e la rotazione della Terra, 110
e la teoria generale, 14, 71, 129
e la teoria ristretta, 14, 33, 53
e il viaggio nel tempo, 121
Eleganza, 130
Elio, 66
Energia e massa, 66
Energia radiante, 68
Energia solare, 66-67
Engel, Leonard, 110 nota
Eötvös, Roland, 77, 179
Equivalenze, principio di, 76, 80, 101, 109
Esperienza ideale, 3-9, 28, 40-45
Esperimento Kennedy-Thorndike, 29
Esperimento Michelson-Morley, L', 13, 34, 41, 47, 71
Etere, 34-35
Etere luminifero, 14
Etere, vento d', 18, 34, 37, 39-40
Euclide, 173
Eureka, 166
Evoluzione della scienza fisica, L', VIII
Evoluzione del pensiero scientifico, L', 111

Fenomeni elettromagnetici, 34; vedi anche: Luce.
Fermi, Enrico, 180
Filosofia della scienza (antologia), VIII
Filosofia della scienza (Frank), VIII
FitzGerald, George Francis, 26, 27, 28, 34, 47, 48, 94, 172
FitzGerald, Lorentz, teoria di, 27-31, 47-48, 60, 94
Forma, 28
Forza centrifuga, 73, 77, 114, 115
Frangia di interferenza, 25, 29
Frank, Philipp, VIII
Friedmann, Alexander, 150
Frontiers of Astronomy, 160 note

Galassie, 14, 113-115, 119, 130-138, 148, 152, 154-155, 160, 166-167
Galileo, 76, 77, 118
Gamow, George, 106, 107, 127, 147, 157, 158, 159, 160, 164
Gemelli, paradosso dei, 118-119, 122-127
Geodetiche, 98-99, 100, 105, 111
Geometria ellittica, 89-90
Geometria euclidea, 34, 87-89, 90, 99
Geometria generale riemanniana, 90
Geometria iperbolica, 90
Geometria non-euclidea, 89-90, 99

Giove, 55
Gold, Thomas, 160
Grande compressione, teoria della, 158
Grande esplosione, teoria della, 158-166
Grandezza, 3-5
Gravità, 55, 76, 96-97, 100, 101, 103-104, 110, 126-127, 130
Gravitoni, 102
Grünbaum, Adolf, VIII, 29

Helmholtz, Hermann, 20
Hoyle, Fred, 148, 160, 163, 164, 166
Huygens, C., 111

Idra, ammasso galattico dell', 148
Idrogeno, 66, 163
Immagine speculare, 11
Inerzia, 14, 71, 72, 100-101, 103-104, 110, 126-127, 130
Ipercilindro, 141
Ipersfera, 141
Istituto Politecnico di Zurigo, 33

Jaffe, Bernard, 21
Jeans, James, VIII

Kennedy, Roy, J., 29, 172, 180

Leibniz, Gottfried, 111
Lemaître, Georges, 150, 157, 158
Lorenz-FitzGerald, teoria di, 27-31, 47-48, 60, 94
Lorentz, Heindrik Antoon, 27, 28, 30, 31, 34, 39, 40, 44, 47, 48 56, 60, 75, 94, 95, 130, 172, 179
Luce, 14; vedi anche: Velocità della luce
Luce stanca, teoria della, 148
Lunghezza, 5, 39-40, 46-50, 53-54, 56-58
Lunghezza assoluta, 39, 45-48

Mach, Ernst, 20, 34, 109, 111, 112, 113, 114, 115, 175
Macmillian, William D., 118
Margulies, Sidney, 167
Maser (orologio atomico), 25
Massa, 54-58, 65-68, 112, 113
Massa a riposo, 56
Massa inerziale, 55-57, 76
Massa-energia, conservazione della, 66
Massa gravitazionale, 55-57, 76
Massa inerziale, 55-57, 76
Massa negativa, 106-107
Massa propria, 56
Massa relativistica, 56, 57, 66, 68
Maxwell, James Clerk, 20
McDonald, James E., 110
McMillan, Edwin M., 119
Mercurio, 102
Metro, 5
Michelson, Albert Abraham, 13, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 34, 37, 41, 47, 71, 118, 127, 172, 179, 180
Michelson e la velocità della luce, 21
Milne, Edward A., 166
Milton, John, 167
Minkowski, Hermann, 87, 93, 94, 95, 179
Modelli dell'universo, 130
  cilindrico, 137-144
  di De Sitter, 144, 148
  di Eddington, 150
  di Einstein, 137-144, 150
  di Friedmann, 150
  di Lemaître, 150
Möller, Christian, 29
Morley, Edward Williams, 13, 21, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 34, 37, 41, 47, 71, 127, 172, 179, 180
Mössbauer Rudolf L., 29, 126, 127, 180
Moto, 11, 13
Moto assoluto, 14-21, 39, 71, 81, 107, 122
Moto uniforme, 35, 36, 37, 69, 74
Muccioli, Alessandro, 168

Natura dell'Universo, La, 160
Naturalisti Tedeschi, Assemblea dei, 95
Newton, Isaac, 35, 73, 74, 75, 76, 85, 103, 105, 106, 107, 173

New Worlds of Moderne Science, 110 note
Novum Organum, 167
Nuovo acceleratore, Il, 7

Olbers, Heinrich, 134, 137, 152, 175
Olbers, paradosso di, 134, 137-138, 152
Onda elettromagnetica, 16, 42; vedi anche: Luce
Orizzonte ottico, 155
Orologi, 30, 44, 56, 123-125, 126-127
Orologio nucleare, 127

Paradiso perduto, 167
Paradosso dell'orologio, vedi: Paradosso dei gemelli
Parallele, postulato delle, 88
Pigrizia cosmica, legge della, 99-100
Poe, Edgard Allan, 166
Poincaré, Jules Henri, 4, 5, 28, 44, 74, 75
Postulati fondamentali, 39, 46
Principio di equivalenza, 76, 80, 101, 109
Principio di Relatività, Il, 95
Pulviscolo cosmico, 148

Quiete assoluta, 107

Radiazione elettromagnetica, 29, 36; vedi anche: Luce
Reichenbach, Hans, 117
Relatività cinematica, 166
Relatività generale, teoria della, 14, 71, 129
Relatività ristretta, teoria della, 14, 33, 53, 129
Relatività, vedi: Teoria della relatività generale e Teoria della relatività ristretta.
Riemann, geometria generale di, 90
Roddier, F., 103
Rotazione, 72, 83, 103, 110-111, 113, 114
Royal Society di Londra, 29, 106
Russell, Bertrand, 31, 99, 110, 117, 118, 146

Schlick, Moritz, 117
Sciama, Dennis, 113, 114, 115, 126, 167
Scientific American, The, 103, 106, 110 note
Scientific Monthly, 75
Shakespeare, W., 157
Simultaneità, 42-46
Simultaneità assoluta, 42-46
Sirio, 103
Sistema di riferimento, 8-9, 13-18, 37, 39, 42, 51, 83, 84, 107, 122
Sistema galileiano, 60
Sistema inerziale, 60, 61, 125-126
Sole, 102-105
Spazio infinito, 160
Spazio-tempo, 87
Spazio-tempo quadridimensionale, 87, 105, 123-124
Spostamento verso il rosso, 102-103, 146-148, 150, 167
Spostamento verso il rosso della luce solare,102-103; vedi anche: Spostamento verso il rosso
Stachel, John, VIII
Stato stazionario, teoria dello, 160-166
Stella nana bianca, 103
Stelle doppie, 17
Struttura ed evoluzione dell'universo, 26
Suono, 18-19

Teller, Edward, 44, 75
Tempo, 6-8, 30-31, 40-51, 56, 57, 91, 118-119
Tempo assoluto, 45
Tempo, dilatazione del, 119
Tempo infinito, 160
Tempo, la macchina del, 120
Tempo locale, 45
Tempo proprio, 45, 121, 122-124
Teoria della relatività; vedi: Teoria della relatività generale e Teoria della relatività ristretta
Thorndike, Edward M., 29, 172, 180
Topologia, 28, 139-140
Toro (ciambella), 77, 151
Townes, Charles H., 25

Twist (danza), 75

Unità dell'Universo, L', 113
Università di Berlino, 20
Università di Copenhagen, 29
Università di Princeton, 77
Universo cilindrico, 141
Universo in contrazione, teoria dell', 158
Universo in diminuzione, teoria dell', 166
Universo in espansione, L', 150
Universo in espansione, teoria dell', 148, 152, 160, 163
Universo in pulsazione, teoria dell', 166
Universo, linea, 93
Uomo che mangiò la fenice, L', 168

Velocità della luce, 14, 37, 38, 39, 49, 50, 56, 57
Velocità del suono, 18-19
Venere, 103
Viaggio nel tempo, 119

Wells, H. G., 7, 120, 121
Western Reserve University, 21
Whitehead, Alfred North, 110, 117
Whitrow, G. J., 26
Whittaker, Edmund, 166
Wood, Robert W., 147

Ylem, 158

Gardner
La relatività per tutti

Lire 3.000

La relatività per tutti

di Martin Gardner/Sansoni Editore